

# CONTAMINACION

ATMOSFERICA  
DE SANTIAGO

*ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES*

HUGO SANDOVAL L. MARGARITA PRENDEZ B. PABLO ULRIKSEN U.

EDITORES





UNITED STATES DEPARTMENT OF JUSTICE  
FEDERAL BUREAU OF INVESTIGATION  
WASHINGTON, D. C. 20535  
CONFIDENTIAL

# CONTAMINACION

ATMOSFERICA  
DE SANTIAGO

ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES

HUGO SANDOVAL L.

MARGARITA PRENDEZ B.

PABLO ULRIKSEN U.

EDITORES

*Roberto Belmar E., María Bertand S., Juan Escudero O.,  
Juanita Gana Q., Ricardo Katz B., Raúl O'Ryan G., Gerd Reinke S.,  
Hugo Romero A., Willy Rutherford D., Alejandro Sáez C.,*







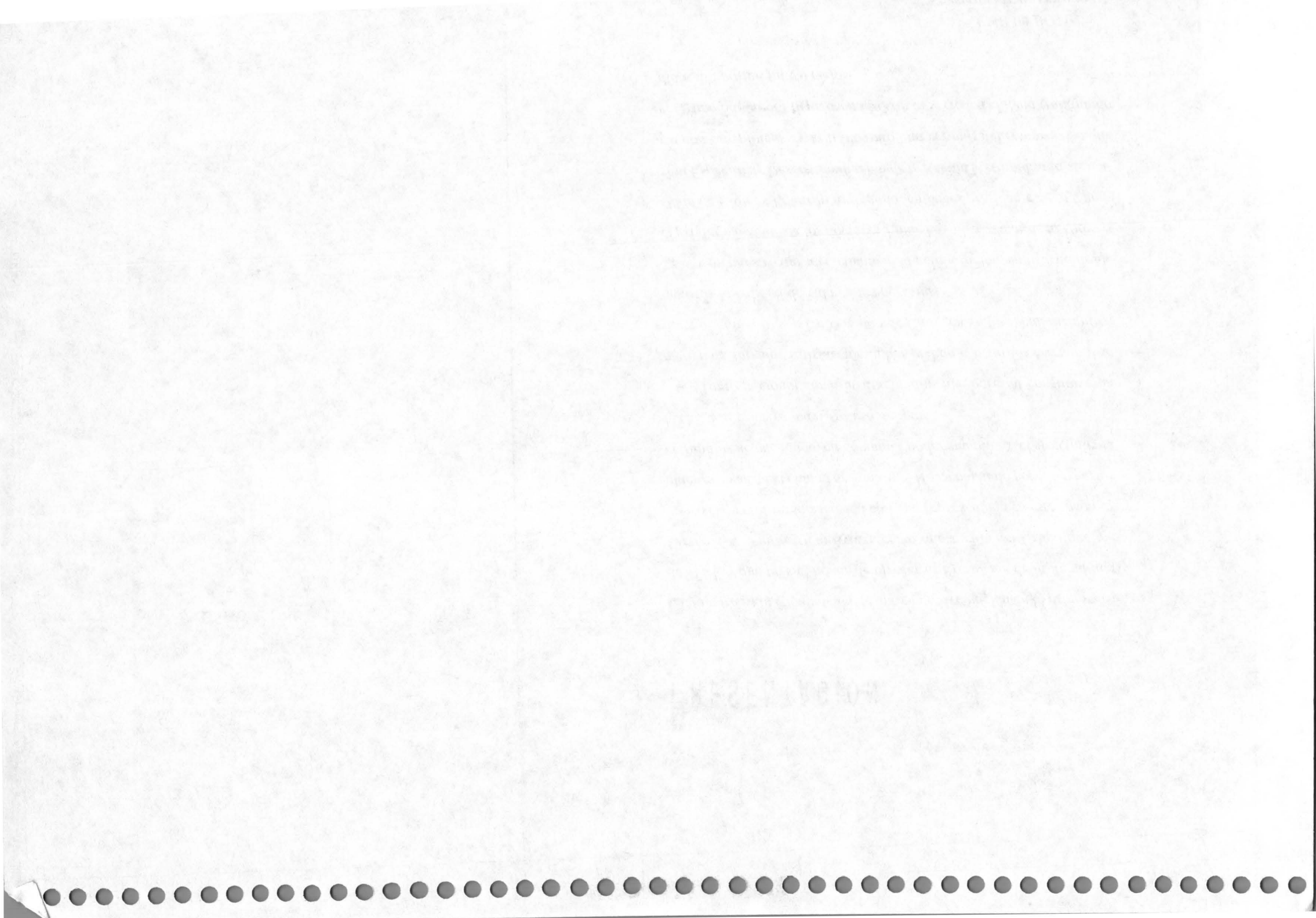
## PRESENTACION

**E**sta obra es la culminación de una iniciativa nacida en la primavera de 1991, y que tuve el honor de ofrecer al Presidente de la República Excmo. Sr. Don Patricio Aylwin como aportación del Grupo que me honro en presidir a la sociedad chilena, representada en este caso por quienes viven en la ciudad de Santiago. Hoy, concluido por los expertos el trabajo encomendado, me complace poder cumplir así el ofrecimiento hecho a la primera magistratura del país.

Tanto personal como institucionalmente, para mí constituye un motivo de singular satisfacción haber podido asociarnos en esta obra, junto al gobierno y la Universidad de Chile, en un fin social dirigido a mejorar la calidad de vida de las personas.

Con nuestro agradecimiento a la colaboración, entusiasta desde el primer momento de los doctores Jaime Lavados, rector de la Universidad de Chile, y Eduardo Arriagada, entonces presidente de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, desearía con estas líneas dejar testimonio una vez más del compromiso que el Grupo Santander tiene asumido con la sociedad chilena trabajando día a día por un futuro mejor.

EMILIO BOTIN  
PRESIDENTE INTERNACIONAL





## PROLOGO

**L**as actividades humanas, desde su origen, han necesitado transformar el medio natural para satisfacer las necesidades de la comunidad. Así, la situación y características del ambiente están unidas a la evolución de la vida del hombre.

En este contexto, la problemática ambiental está relacionada con el necesario proceso de desarrollo de los países, lo cual crea comprensibles conflictos entre el medio natural y el medio social. La complejidad de los estudios del medio ambiente y del desarrollo sustentable, así como su tratamiento, exigen cada vez más un marco integral y sistematizado que dé curso oportuna y adecuadamente a las evaluaciones del impacto en el entorno que ese proceso de desarrollo puede provocar.

En los tiempos actuales, la protección del ambiente y los objetivos del desarrollo económico ya no pueden considerarse con fines mutuamente excluyentes. Cada día es más evidente la necesidad de establecer, precisar y regular la interrelación entre las grandes cuestiones que plantea la protección del medio ambiente y el conjunto de las actividades de la vida moderna, incluyendo las áreas de la economía, el comercio y la industria, entre otras.





Asimismo, la importancia de la cuestión ambiental trasciende las fronteras de los países, y se transforma en un tema que no los discrimina entre desarrollados o del Tercer Mundo aunque, obviamente, estos últimos no disponen de suficientes recursos económicos para destinar a la protección del medio ambiente. Así, este tema debe necesariamente tratarse en una discusión libre y abierta de todos los aspectos relacionados con él y con el desarrollo, pero asumido como un desafío común y compartido por los diferentes actores involucrados y cuyos efectos alcancen a todas las naciones, a fin de lograr que el desarrollo y el crecimiento sean compatibilizados con el respeto a los equilibrios naturales.

Desde hace algunos años en los organismos internacionales, en los centros académicos y en el poder político, se ha buscado mediante estrategias de desarrollo, incorporar, el concepto de medio ambiente en los planes de acción gubernamental a fin de que el propio desarrollo sea sustentable en el largo plazo.

La voluntad política es fundamental para tratar los problemas ambientales acumulados, así como también, para aplicar las medidas correctoras que éstos exigen. El Estado tiene, por lo tanto, un rol insustituible en la identificación, evaluación y predicción de los efectos ambientales positivos y negativos del desarrollo.

Por otra parte, el modelo de crecimiento económico que hoy se aplica en la mayoría de los países del mundo y, en particular, en Chile, ha cambiado los términos de relación entre el sector público y privado. En efecto, el sector privado ha dejado de ser un observador pasivo del estudio, fijación y aplicación de políticas públicas, transfor-

mándose en un actor importante de todo el quehacer nacional.

Este libro es un buen ejemplo de dicho nuevo enfoque. A través de un trabajo conjunto se unen el mundo científico, el sector público y el sector privado para contribuir al estudio y a la búsqueda de opciones a los grandes problemas nacionales. La sesquicentaria Universidad de Chile pone al servicio de la comunidad nacional su tradición, base científica y las condiciones de globalidad e integración que son necesarias para percibir y sintetizar el estudio de los problemas de la contaminación atmosférica. Una entidad pública como la Comisión de Descontaminación de la Región Metropolitana entrega su conocimiento del problema y su voluntad política para tratarlos y aplicar las medidas correctoras que éstos exigen. Para completar esta trilogía esencial, el Banco Santander, aporta su visión empresarial y contribuye de un modo sustancial al financiamiento del proyecto.

El trabajo es, sin duda, un muy buen ejemplo del modo en que el Estado, la Universidad y el Sector Privado pueden, y en mi opinión, deben aunar sus esfuerzos para enfrentar, en el caso presente, el gravísimo problema de la contaminación atmosférica de Santiago. Esta ha sido, para la Universidad de Chile, una experiencia enriquecedora de efectivo trabajo común. A través de ella hemos aprendido un poco más, no sólo del problema en sí mismo, sino del particular modo en que cada uno interpreta su rol en la sociedad.

DR. JAIME LAVADOS MONTES

RECTOR

UNIVERSIDAD DE CHILE

AGOSTO DE 1993





## PREFACIO

**E**l libro que ahora se edita representa un importante esfuerzo para contribuir a la búsqueda de las acciones prácticas que deben seguir al conocimiento científico puro o diagnóstico, esto es, a la proposición de soluciones para el control de la contaminación. Esto ha sido posible gracias a la acción conjunta de la universidad, la empresa privada y el gobierno, manifestada a través de la colaboración entre la Universidad de Chile, el Banco Santander y la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana.

A fines de 1991, se dio comienzo al proyecto "Contaminación atmosférica de Santiago, Estado actual y Soluciones", destinado a recopilar la información existente sobre el problema, analizar posibles soluciones y entregar antecedentes para apoyar la toma de decisiones por parte del sector público y privado. Esta iniciativa nació de una preocupación personal del presidente internacional del Grupo Santander, don Emilio Botín, quien durante una visita al país en septiembre de 1991 le ofreció al Presidente de la República, don Patricio Aylwin Azócar, el apoyo de la institución para realizar un estudio que contribuyera a la descontaminación de Santiago. El proyecto estuvo a cargo de la Dirección de Planificación de la Universidad de Chile y fue desarrollado por



los investigadores y profesores Hugo Sandoval L., Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, quien actuó como director del proyecto, Margarita Préndez B., Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas y Pablo Ulriksen U., Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

En Diciembre de 1992, se realizó un taller internacional de análisis de opciones para solucionar la contaminación atmosférica de Santiago, en el cual participaron investigadores de varios países. Los trabajos presentados en ese taller y las discusiones realizadas durante su desarrollo, han servido como fuentes de información y análisis de algunas de las ideas incorporadas en este libro.

El libro consta de tres partes. En la primera (Capítulos 1 a 9) se entregan diferentes aspectos relacionados con el diagnóstico de la contaminación atmosférica de Santiago, indicando los factores más relevantes. En la segunda parte (Capítulos 10 a 12), se presentan algunas opciones de solución para el problema de contaminación atmosférica de la ciudad. La tercera parte (Capítulo 13) corresponde a una discusión general, e incluye un conjunto de conclusiones y recomendaciones.

En el Capítulo 1 se desarrollan conceptos generales sobre contaminación atmosférica, con el fin de introducir al lector en el tema, y una presentación del problema. El Capítulo 2 presenta las características meteorológicas de la cuenca de Santiago, incluyendo aspectos de circulación atmosférica regional, flujos de aire dentro de la cuenca y otros factores importantes para la comprensión del problema de contaminación. En el Capítulo 3 se indican algunas características de la ciudad y se discuten las consecuencias de su desarrollo urbano. En el

Capítulo 4 se presentan los principales procesos emisores de contaminantes y se analizan los aportes de diferentes tipos de fuentes. El Capítulo 5 entrega una visión actualizada de los contaminantes presentes en la atmósfera de la ciudad y sus comportamientos temporales y espaciales. En el Capítulo 6 se trata el tema del impacto sobre la salud humana que tienen algunos contaminantes atmosféricos y se presentan algunos antecedentes para la ciudad de Santiago. En el Capítulo 7 se presentan algunos antecedentes sobre emisiones de los vehículos de Santiago. En el Capítulo 8 se presentan las políticas y planes de control de la contaminación que están siendo aplicados en la Región. En el Capítulo 9 se analiza el marco legal e institucional dentro del cual se puede desenvolver el proceso de toma de decisiones por parte de la autoridad. En el Capítulo 10 se discuten las experiencias de otros países para solucionar el problema en algunas de sus grandes ciudades. Entre otras se discuten los casos de Ciudad de México y Sao Paulo. En el Capítulo 11 se muestran algunas de las tecnologías actualmente utilizadas para disminuir las emisiones de las fuentes fijas. En el Capítulo 12 se analizan las políticas que pueden utilizarse en problemas de contaminación atmosférica, con énfasis en dos opciones: los controles directos y la aplicación de incentivos económicos. En el Capítulo 13 se incluye una discusión general del problema de Santiago, apoyándose en los antecedentes entregados en los capítulos anteriores. Se entregan algunas conclusiones que es posible extraer a la luz del conocimiento actual de los factores que influyen sobre la contaminación de Santiago y del análisis de diferentes opciones que pueden utilizarse para mejorar la calidad del aire en la ciudad.



## AGRADECIMIENTOS

**S**e agradece el apoyo recibido de parte de numerosas personas e instituciones, que hicieron posible la realización del Taller Internacional que sirvió como fuente de información y análisis de varios temas tratados en este libro.

En él, en calidad de expositores de trabajos participaron Thomas H. Tienberg, Brian J. Morton, Robert A. Zerbonia, Michael P. Walsh, Bart D. Ostro, Katarina Victorin, Gunnar Nyquist, Bernard J. Hamilton, Pedro P. Oyola, Dario A. Levaggi, Rolf Seidler, Frank Durskeck, Gunnar S. Eskeland, Francisco Guzmán, Walter Lazzarini, Graham Holland, Roberto Belmar, Juan Escudero O. y Ricardo Katz B. Como panelistas en el Taller participaron Jaime Solari, Jaime Undurraga, Eduardo Arriagada M. y José Miguel Sánchez. En calidad de moderadores de las reuniones, actuaron Hugo Romero A., Ricardo Katz B., José Miguel Sánchez, Jaime Undurraga, Raúl O'Ryan, Claudio Simián y María Isabel Rivara.

Las instituciones que colaboraron en la realización del Taller son: Organización de Estados Americanos, Embajada de Suecia, Deutsche Gesellschaft, fur Technische Zusammenarbeit (GTZ), Agencia Internacional para el Desarrollo (U.S. AID), U.S. Environmental Protection Agency, Agencia de Cooperación Internacional del Gobierno de Chile. También colaboraron las empresas nacionales Gas Natural S.A. y DIPREL S.A.

Se agradece especialmente la colaboración de Lucía Parra B., quien se desempeñó como secretaria ejecutiva del proyecto y tuvo a su cargo las tareas de apoyo al Taller Internacional.



# SUMARIO

<b>CAPITULO 1</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b>	<b>23</b>	<b>CAPITULO 7</b>	<b>EMISIONES VEHICULARES Y POLITICAS NORMATIVAS</b>	<b>213</b>
	<i>Margarita Préndez B.</i>			<i>Ricardo Katz B. Gerd Reinke S.</i>	
	<i>Pablo Ulriksen U.</i>			<i>Alejandro Sáez C.</i>	
<b>CAPITULO 2</b>	<b>FACTORES METEOROLOGICOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO</b>	<b>37</b>	<b>CAPITULO 8</b>	<b>PRIORIZACION EN LAS ACCIONES DEL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO</b>	<b>237</b>
	<i>Pablo Ulriksen U.</i>			<i>Juan Escudero O.</i>	
<b>CAPITULO 3</b>	<b>LA CIUDAD</b>	<b>61</b>	<b>CAPITULO 9</b>	<b>INSTITUCIONALIDAD Y MARCO LEGAL VIGENTE</b>	<b>261</b>
	<i>María Bertrand S.</i>			<i>Ricardo Katz B.</i>	
	<i>Hugo Romero A.</i>		<b>CAPITULO 10</b>	<b>LAS EXPERIENCIAS DE OTROS PAISES</b>	<b>291</b>
<b>CAPITULO 4</b>	<b>EMISIONES DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA</b>	<b>85</b>		<i>Juanita Gana Q.</i>	
	<i>Hugo Sandoval L.</i>		<b>CAPITULO 11</b>	<b>TECNOLOGIAS DE ABATIMIENTO</b>	<b>339</b>
<b>CAPITULO 5</b>	<b>CARACTERISTICAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS</b>	<b>109</b>		<i>Willy Rutherford D.</i>	
	<i>Margarita Préndez B.</i>		<b>CAPITULO 12</b>	<b>POLITICAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACION ATMOSFERICA: ASPECTOS CONCEPTUALES Y EMPIRICOS</b>	<b>377</b>
<b>CAPITULO 6</b>	<b>EFFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS</b>	<b>187</b>		<i>Raúl O'Ryan G.</i>	
	<i>Roberto Belmar E.</i>		<b>CAPITULO 13</b>	<b>DISCUSION GENERAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>411</b>
				<i>Hugo Sandoval L. Margarita Préndez B.</i>	
				<i>Pablo Ulriksen U.</i>	





CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO  
ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES

*PARTE I*

**D**IAGNOSTICO DE LA CONTAMINACION  
ATMOSFERICA DE SANTIAGO

*CAPITULO 1*

*CAPITULO 2*

*CAPITULO 3*

*CAPITULO 4*

*CAPITULO 5*

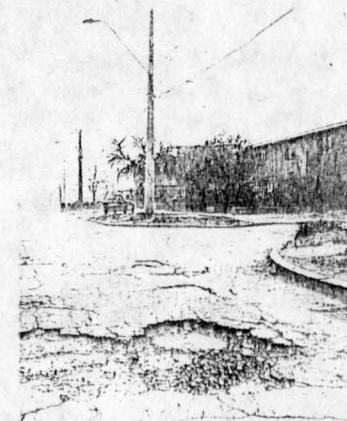
*CAPITULO 6*

*CAPITULO 7*

*CAPITULO 8*

*CAPITULO 9*





*CAPITULO I*  
**ASPECTOS GENERALES**  
*Margarita Préndez B.*  
*Pablo Ulriksen U.*

<i>La contaminación del aire y sus efectos</i>	25
<i>Metodologías utilizadas en problemas de contaminación atmosférica</i>	31
<i>El caso de Santiago</i>	32
<i>Referencias bibliográficas</i>	36



■ **Margarita Préndez Bolívar**  
Químico Universidad de Chile,  
Master en Ciencias Nucleares  
y Radio Protección de la  
Universidad de Louvain-La-Neuve  
de Bélgica. Doctora en Ciencias  
con mención en Química Nuclear,  
post doctorado en aerosoles  
atmosféricos en NASA, AMES, Research  
Center en Estados Unidos, miembro del  
Comité Científico Internacional para  
la Evaluación de la Capa de Ozono  
Estratosférico, Consultor de Naciones  
Unidas en el tema del Ozono  
Atmosférico.  
También es autora del capítulo  
5 de este libro.

■ **Pablo Ulriksen Ugarte**  
Ingeniero Civil (egresado),  
Universidad de Chile.  
Cursos de postgrado en Difusión  
Atmosférica, Dinámica de Geofluidos  
y otros.  
Especialista en meteorología  
y contaminación atmosférica.  
Ha desarrollado estudios y participado  
en proyectos aplicados a problemas de  
contaminación atmosférica, en Santiago,  
en fundiciones de cobre y otros lugares,  
en temas relacionados con mediciones  
y análisis de factores meteorológicos,  
caracterización de contaminantes,  
evaluación de emisiones, desarrollo  
y aplicación de modelos de dispersión  
de contaminantes y otros.  
También es autor del capítulo 2  
de este libro.



## LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE Y SUS EFECTOS

[El aire es un recurso indispensable para la vida sobre el planeta. El oxígeno, presente en una proporción aproximada al 21% del volumen del aire, es utilizado en los procesos biológicos fundamentales y en innumerables procesos de combustión en industrias, vehículos y fuentes de calefacción.]

[El hombre utiliza la atmósfera como un receptáculo de muchos de los desechos que emite. Mezclas de gases y partículas son devueltas a la atmósfera como subproductos de los procesos de combustión, respiración y por otras actividades propias de las transferencias de energía.]

[Se espera que la naturaleza se encargue de limpiar esos residuos. Si bien es cierto que existen mecanismos naturales para realizar estas tareas, no se puede lograr completamente ese propósito. Los ciclos naturales tienen velocidades propias y capacidades determinadas para actuar. Se requiere tiempo para que el viento remueva los desechos emitidos desde una ciudad, para que la vegetación absorba algunos gases y para la sedimentación de material particulado.]

[El desarrollo industrial ha producido una modificación de los equilibrios naturales en diferentes regiones. En numerosas áreas urbanas, el volumen de desechos emitidos y la velocidad a la cual se incorporan al aire, sobrepasan las posibilidades de depuración de los ciclos naturales.]

[El término contaminación del aire tiene diferentes definiciones. Una, usualmente aceptada, se refiere a la presencia en la atmósfera de una o más sustancias agregadas directa o indirectamente por el hombre en cantidades tales que afectan adversamente a los seres humanos, animales, vegetales o a los materiales.] Esta definición da como resultado un escenario cambiante en el tiempo, pues la calidad de contaminante depende de los conocimientos científicos de la época. La cantidad de sustancias consideradas contaminantes del aire ha ido aumentando a lo largo de los años.

Las formas en que los contaminantes son producidos y liberados a la atmósfera tienen una base científica conocida. Sin embargo, muchas sustancias se continúan inyectando a la atmósfera, pese a que provocan daño a los seres humanos, a menudo por factores que nada tienen que ver con la ciencia y la tecnología. Algunos de estos factores derivan de motivaciones económicas, políticas e incluso psicológicas. Si se desea solucionar los problemas, es preciso reconocer la compleja naturaleza de dichas causas.

Las iniciativas individuales han sido incapaces de resolver los problemas causados por la contaminación en las grandes áreas urbanas. Por lo tanto, los gobiernos, en sus diferentes niveles, tienen la obligación de enfrentar el problema y adoptar las medidas de control. No cabe duda que la participación ciudadana es una pieza importante en esta lucha, pero su acción debe ser coordinada y encauzada hacia objetivos que van más allá de la perspectiva individual.]

[La acción política es decisiva para implementar las soluciones, pero no es menos cierto que la ciencia y la tecnología son vitales para encontrar las formas de solucionar los problemas.]

[En consecuencia, es obvia la necesidad de emprender el desarrollo de tareas científicas que permitan conocer con cabalidad los factores y mecanismos que explican las características físicas y químicas de los contaminantes y su comportamiento; por otra parte, es preciso desarrollar tecnologías apropiadas para disminuir las emisiones de contaminantes, única manera de disminuir sus concentraciones en la atmósfera.]

La contaminación atmosférica presenta relaciones complejas entre emisiones, procesos atmosféricos y efectos sobre diferentes receptores. La Figura 1.1 muestra en forma esquemática estas relaciones.

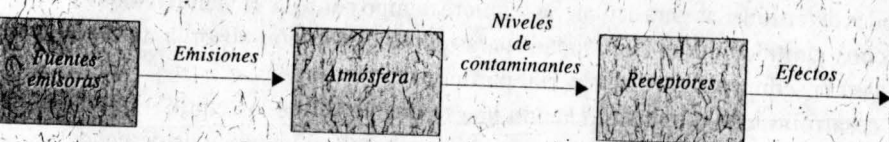


Figura N° 1.1: Sistema fuentes emisoras-atmósfera-receptores.

[A través de diversos procesos emisores, se inyectan contaminantes a la atmósfera. Las especies contaminantes emitidas dependen del tipo de fuente emisora (vehículos, industrias, residencias, etc.). Las tasas de emisión en una ciudad muestran distribuciones espaciales y variaciones en el tiempo que dependen de la localización y ritmos de actividad de los diferentes tipos de fuentes.]

[Las sustancias emitidas son transportadas y dispersadas en la atmósfera. Algunas participan en reacciones y en transformaciones químicas y físicas, dando origen a otras especies. Los contaminantes son también afectados por otros procesos, como la remoción por efecto de las precipitaciones o la fijación en la superficie y en la cubierta vegetal (deposición húmeda y seca).]

[Los niveles de contaminación resultantes de estos procesos, pueden afectar a diversos receptores, entre ellos, seres humanos, animales, plantas, materiales y ciertas características del ambiente. Los efectos más conocidos incluyen la agudización de enfermedades bronco-pulmonares, pérdida de rendimiento de cosechas, suciedad de edificios y ropa y reducción de la visibilidad en zonas contaminadas.]

[Los efectos indeseables de la contaminación atmosférica se previenen manteniendo los niveles dentro de valores aceptables, definidos en las normas de calidad del aire. Con el fin de reducir los efectos, se deben disminuir los niveles de contaminación, para lo cual hay que actuar sobre las emisiones. Por lo tanto, los controles aplicados a las fuentes emisoras tienen un efecto final sobre los receptores, pasando por un complejo sistema de procesos y transformaciones.]

[Los contaminantes del aire se pueden clasificar en dos categorías: primarios y secundarios. Los primarios son emitidos directamente a la atmósfera y entre los más importantes se encuentran el material particulado y algunos gases como óxidos de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Los aportes relativos de las distintas fuentes que los generan, varían de una comunidad a otra, pero, en líneas generales, ocurre que las fuentes estacionarias, como incineradores, plantas generadoras de energía eléctrica que utilizan carbón o petróleo, e industrias, generan las mayores cantidades de los dos primeros contaminantes, en tanto que los vehículos motorizados son responsables mayoritarios de los dos últimos.] En el caso de Santiago, el polvo del suelo, una fuente de origen natural, tiene un peso muy importante en las emisiones de material particulado.] Bajo condiciones apropiadas, los contaminantes primarios sufren reacciones químicas en la atmósfera y generan los llamados contaminantes secundarios. Algunas de estas reacciones requieren luz solar para que ocurran a velocidades apreciables y de aquí que se las denomine reacciones fotoquímicas. Un contaminante secundario muy conocido a nivel de los centros urbanos es el ozono. Otro es el ácido sulfúrico y sus derivados neutralizados, los sulfatos (que aparecen como aerosoles secundarios), que provienen de las transformaciones del  $\text{SO}_2$  en la atmósfera.]

Los efectos adversos de los contaminantes son particularmente evidentes en los grandes centros urbanos, donde innumerables fuentes contribuyen a las emisiones. [Como consecuencia de la mezcla en la atmósfera, los efectos de cada una de las emisiones en particular no son identificables. Por otra parte, es frecuente el "sinergismo", término que indica que los efectos observados por la acción simultánea de dos o más contaminantes son de mayor intensidad que la suma de los efectos producidos por los contaminantes cuando actúan por separado. También se presenta sinergismo cuando un contaminante sufre transformaciones en la atmósfera y genera



producen en un área geográfica extendida, los problemas alcanzan una escala regional. Por ejemplo, las grandes ciudades originan un penacho de aire contaminado, que afecta las regiones ubicadas viento abajo. Un ejemplo de la extensión de este problema es la contaminación en la costa este de los Estados Unidos de Norteamérica, donde el flujo de aire hacia el norte produce un aumento progresivo de niveles de contaminantes al ir agregándose las emisiones de grandes ciudades ubicadas en ese sector. Esta situación puede crear también conflictos internacionales, pues dependiendo de las distancias recorridas, el aire contaminado puede trasladar los contaminantes de un país a otro, situación que es frecuente en Europa.

La contaminación a escala local ocurre usualmente por efecto de una o más fuentes emisoras ubicadas en el entorno de ese lugar. Los ejemplos típicos son las áreas céntricas de las ciudades, en las cuales se superponen los efectos de las emisiones de numerosas fuentes fijas (actividades industriales, comerciales y residenciales) con las emisiones originadas por los vehículos motorizados.

La contaminación al interior de las viviendas o en recintos cerrados, corresponde a una manifestación del problema a escala reducida. Sin embargo, debido a la larga permanencia de las personas en dichos recintos (hogares, oficinas, medios de transporte), la contaminación existente en dichos microambientes es muy importante. Depende no sólo de los procesos de emisión o de remoción de contaminantes que ocurren en su interior sino también de los niveles existentes en el ambiente exterior.

Todo esto pone de manifiesto que la escala de influencia del hombre es ahora comparable con la capacidad total de la naturaleza. Ya no es posible suponer que podemos emitir impunemente y que el viento se encargará de limpiar y llevarse todos nuestros desechos.

El costo de los efectos adversos producidos por los contaminantes del aire sobre el ambiente y los seres humanos, no se puede calcular exactamente porque ellos son a menudo indirectos o subrepticios. Sin embargo, los economistas han hecho algunos cálculos y existen cifras estimadas en diferentes países respecto al dinero que se ahorraría en hospitales o medicinas, o en relación a las pérdidas en la agricultura, industria forestal u otras.

No se sabe demasiado respecto a los efectos producidos por exposiciones prolongadas a los niveles de contaminación comúnmente encontrados en ciudades. Mucho más conocidos son los efectos producidos por exposiciones a concentraciones muy altas durante varios días consecutivos. Son clásicos los episodios ocurridos en Bélgica (Vallée de La Meuse), Inglaterra (Londres) y Estados Unidos (Donora, Pensilvania), durante los cuales se produjo un aumento de la morbilidad y de la mortalidad. Por otra parte, son muy poco conocidos los efectos derivados de exposiciones largas o repetidas a niveles relativamente bajos (exposición crónica). Se ignora si los seres humanos se pueden adaptar a los ambientes contaminados o si la exposición crónica producirá daños irreparables. Esto plantea serias interrogantes sobre el futuro de la raza humana, tal como hoy la conocemos.



## METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN PROBLEMAS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Tal como se ha visto, los problemas de contaminación atmosférica tienen un gran nivel de complejidad, debido a las interacciones entre diferentes fenómenos y a la variedad de escenarios en que se presentan. Las metodologías utilizadas para encarar los problemas de contaminación atmosférica tienen diversos componentes complementarios entre sí. Entre ellas, podemos mencionar las siguientes: ]

- ✓ Mediciones directas de emisiones, de concentraciones de contaminantes y de efectos, con el fin de identificar, cuantificar y jerarquizar los problemas de contaminación.
- ✓ Identificación y análisis de procesos específicos relacionados con la contaminación: procesos que originan emisiones, diversos procesos de transporte y de transformaciones de contaminantes que ocurren en la atmósfera, y procesos que ocurren a nivel de receptores, dando lugar a efectos indeseables, dañinos o perjudiciales.
- ✓ Desarrollo de modelos de comportamiento de cada una de las partes del problema, que permitan comprender y simular los diferentes procesos.
- ✓ Análisis de efectos que se producen por cambios en los procesos, con el fin de identificar posibles medidas de control.
- ✓ Evaluación técnica y económica de diferentes opciones de control del problema.
- ✓ Desarrollo de planes para alcanzar metas de calidad del aire, en determinados plazos.
- ✓ Diseño de la organización institucional, infraestructura y reglamentación requeridas para aplicar los planes de control.
- ✓ Monitoreo continuo de las respuestas del sistema a los cambios introducidos por la aplicación de medidas de control; evaluación de las estrategias utilizadas y aplicación de correcciones a los planes de control.

Todas estas metodologías, con diferentes grados de detalle y profundidad, se han utilizado en el caso de Santiago, para estudiar y reducir el problema de contaminación atmosférica que afecta a la ciudad.





## EL CASO DE SANTIAGO

Un caso típico del problema de contaminación atmosférica a nivel regional lo constituye la cuenca de Santiago, en la cual toda el área de la ciudad y su entorno están afectados por la acumulación de contaminantes en la atmósfera. Desde hace algún tiempo, la ciudad de Santiago se disputa con Sao Paulo y Ciudad de México, el desagradable título de ser la más contaminada de Latinoamérica, aún cuando su población y extensión alcanzan sólo a una fracción de dichas ciudades.

Las altas concentraciones de material particulado en toda la ciudad, de monóxido de carbono en las áreas más céntricas y de ozono en el área oriente, generan alarma entre la población. Los elevados índices de contaminación, en especial en los meses de invierno y los problemas de salud, aparentemente vinculados, suscitan la preocupación y el interés de los medios de comunicación, de las autoridades de gobierno y de algunos sectores empresariales.

El material particulado supera sistemáticamente, a nivel de toda la ciudad, la norma oficial en Chile para material bajo 45 micrómetros y los niveles aceptados para material respirable menor a 10 micrómetros. Una situación similar de excedencia de las normas, aunque localizada en algunos sectores de la ciudad, ocurre con los gases monóxido de carbono y ozono. Estos corresponden a contaminantes primario y secundario, respectivamente, y son causados básicamente por los vehículos motorizados.

La ocurrencia de elevados niveles de contaminación se debe al hecho de tener condiciones meteorológicas y topográficas muy poco favorables para la ventilación y dispersión de los contaminantes. El aumento poco controlado de las fuentes emisoras durante las últimas décadas, ha llevado a una saturación de la cuenca.

No existen antecedentes históricos de episodios graves con aumento de tasas de mortalidad en Santiago, tales como los que se han registrado en otros lugares del mundo. Las características de la contaminación atmosférica de Santiago son diferentes a las de otras ciudades, debido a las particularidades de sus fuentes emisoras y las características de la cuenca. No hay antecedentes que permitan pronosticar en forma precisa los efectos que tendrán los niveles crecientes de contaminación atmosférica sobre las personas expuestas a ella. Sin embargo, no deben esperarse esos efectos para tomar medidas de control.

Los profesionales vinculados al tema han estado trabajando por casi dos décadas, al interior de las universidades y de otras instituciones, con el objeto de caracterizar física y químicamente el aire de Santiago, de comprender las condiciones meteorológicas que más influyen sobre su comportamiento, de identificar los procesos que generan los contaminantes más importantes, y de analizar el sinnúmero de fenómenos que producen la contaminación del aire y que permiten evaluar los efectos sobre la salud humana y el ambiente.

Múltiples factores, incluyendo el fuerte componente derivado de la falta de recursos, han confluído para hacer que este conocimiento no esté del todo redondeado. Sin embargo, los avances en la materia son cada vez más importantes y en todo caso suficientes como para implementar algunas estrategias de acción a corto, mediano y largo plazo.

Durante varios años y en especial en la última década, las autoridades de gobierno han buscado y a veces obtenido financiamiento para la realización de proyectos que han contribuido positivamente a un diagnóstico más afinado de la situación actual.

Desde hace varias décadas se desarrollan trabajos de investigación sobre diversos aspectos de la contaminación atmosférica de Santiago, principalmente en algunas universidades (y especialmente en la Universidad de Chile). El primer conjunto de trabajos sistemáticos se remonta a 1961. Desde la misma época, se han realizado estudios sobre los factores meteorológicos de la región. Otros aspectos que han sido investigados utilizando diferentes metodologías se refieren a la distribución de tamaños de partículas y a su composición. También se han desarrollado estudios relacionados con visibilidad, efectos sobre salud y características de las emisiones. Referencias a estos trabajos se pueden encontrar en varios capítulos del libro.

Las mediciones sistemáticas de contaminantes en Santiago comienzan el año 1964, a cargo del Ministerio de Salud, con la instalación de dos estaciones simples. El primer estudio integral se desarrolló entre 1976 y 1978, con la instalación de una red de monitoreo, medición de emisiones, compilación de un inventario de emisiones para Santiago, estudio de factores meteorológicos para aplicar un modelo simple de dispersión de contaminantes y proposición de varias medidas de control (CORFO, 1978). La red de monitoreo incluyó una estación de registro continuo y diez, estaciones manuales.

En 1980, se realizó un estudio destinado a evaluar una posible tarificación a las emisiones de contaminantes en la Región Metropolitana (IASA, 1981). Dicho trabajo desarrolló diversos aspectos de la contaminación atmosférica de Santiago, incluyendo análisis de mediciones de concentraciones, parámetros meteorológico de emisiones, aplicación de un modelo de dispersión, evaluación de opciones de tecnologías de control y evaluaciones económicas de las alternativas.

Entre 1983 y 1985, se desarrolló un estudio de caracterización física y química del material particulado de la atmósfera de Santiago (Universidad de Chile, 1985), el cual se realizaron determinaciones de numerosas especies químicas presentes en las partículas. Se estudió la distribución por tamaños, se determinaron niveles de partículas en el aire del entorno de la ciudad (niveles base) y se estimaron los aportes de diferentes tipos de fuentes, a través de la aplicación de análisis estadístico, modelo tipo receptor, modelos de dispersión e interpretación directa de las características del material particulado.

Entre 1986 y 1990, se ejecutaron una serie de proyectos que contaron con financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Uno de estos proy-



tos consistió en la instalación de una red de monitoreo automático de contaminantes atmosféricos y parámetros meteorológicos en Santiago, que funciona en forma permanente desde 1988. La red está formada por cuatro estaciones ubicadas en el área central de la ciudad, una estación ubicada en el sector nororiente y una estación con mediciones meteorológicas, conectadas a un computador central. Esta red está a cargo del Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana.

Otro proyecto de esta serie desarrolló un inventario de fuentes emisoras para Santiago, incluyendo la creación de una base de datos en computador para estimación de emisiones (Cade-Idepe, 1988). También se instaló un laboratorio para medición de emisiones vehiculares y se analizó el ciclo típico de funcionamiento de buses en la ciudad (ciclo de manejo).

Un tercer proyecto desarrolló un modelo de dispersión de contaminantes para Santiago, del tipo celdas múltiples con varias capas en el sentido vertical, con capacidad para simular sustancias inertes y reacciones fotoquímicas (ENSR et al. 1990). Durante este proyecto se realizaron mediciones adicionales de contaminantes y parámetros meteorológicos.

Dentro de esta serie, se realizó un estudio para diseñar un sistema de emisiones transables en la Región Metropolitana (Intec-Chile y Universidad de Chile, 1990). En este proyecto se propusieron metas de calidad de aire y se diseñó un plan para alcanzarlas en un determinado plazo. Como parte del estudio, se revisaron alternativas tecnológicas para diferentes fuentes emisoras, se aplicó el modelo de dispersión para diferentes escenarios futuros y se evaluaron los esfuerzos de reducción de emisiones necesarios para alcanzar las metas propuestas.

Otro estudio de este conjunto corresponde a una evaluación de posibles efectos de la contaminación atmosférica de Santiago sobre la salud de las personas (ARA et al. 1990). El estudio epidemiológico utilizó una ciudad cercana (Los Andes) como patrón de comparación. Los resultados encontrados mostraron que los escolares de Santiago presentaban síntomas respiratorios atribuibles a la contaminación atmosférica con mayor frecuencia que el grupo de comparación. También se encontró que las enfermedades respiratorias en la población eran significativamente más frecuentes en Santiago que en Los Andes.

Actualmente, la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana está impulsando una serie de proyectos relacionados con la contaminación del aire. Durante 1992, se desarrolló un estudio destinado a diseñar un organismo para el control de fuentes fijas, que condujo a la creación de un grupo de trabajo dedicado a estas labores (Programa de Control de Emisiones de Fuentes Fijas). En forma paralela, se está implementando el control de fuentes móviles, a través de un proyecto que estudió el desarrollo de la capacidad estatal de control de estas fuentes y que incluye la instalación de un laboratorio de certificación de emisiones de motores de vehículos livianos y pesados.

También se encuentra en desarrollo un proyecto para diseñar e instalar un sistema de vigilancia de los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud,

que incluye la recolección de información relacionada con síntomas en niños, atenciones en consultorios, causas de mortalidad y otros. Otro proyecto en ejecución se refiere al desarrollo de metodologías para estimación y control de las emisiones de polvo levantado desde calles pavimentadas y de tierra, que incluye un catastro de tipos de calles y mediciones directas de parámetros relevantes.

El control de los problemas de contaminación atmosférica en Santiago estuvo inicialmente a cargo del Ministerio de Salud. Posteriormente, en el proceso de regionalización del país, se creó el Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana. Desde 1990, la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana está encargada del desarrollo de los planes de descontaminación y de la coordinación de los esfuerzos realizados por diferentes entidades estatales. La ley marco sobre medio ambiente, actualmente en discusión en el Congreso Nacional, crea Comisiones Regionales de Medio Ambiente. En la Región Metropolitana, las funciones de la Comisión Especial serán probablemente asumidas por la respectiva Comisión Regional.

La legislación actual relacionada con la contaminación atmosférica, no forma un cuerpo único y orgánico, debido a que se ha ido creando en forma parcial a lo largo de los años, apoyada en una estructura institucional del Estado que no está adecuada al tratamiento integral de los problemas de medio ambiente. En la actualidad se cuenta con un conjunto de decretos y resoluciones que tienen relación con normas de calidad del aire, normas de emisión, restricciones de funcionamiento a determinados procesos emisores y otras.

Aún cuando la estimación del costo de la vida humana es un tema moralmente no planteable, es posible hacer un cálculo que considere las economías logradas en cuanto a la salud de la población, por el hecho de habitar una ciudad con aire limpio. Existen algunos planteamientos recientes en este sentido para la ciudad de Santiago. Los costos asociados a la disminución de la contaminación atmosférica no han sido evaluados en forma integral. Los beneficios económicos que puede traer la disminución de la contaminación están aún menos estudiados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ARA, SEEBLA, CONSECOL, 1990: "Estudio epidemiológico sobre efectos de la contaminación atmosférica". Proyecto desarrollado para la Intendencia de la Región Metropolitana. Informe Final.
- Cade-Idépe, 1989: "Universo de fuentes emisoras e inventario real de emisiones de contaminantes a la atmósfera". Proyecto desarrollado para la Intendencia de la Región Metropolitana. Informe Final.
- CORFO, 1978: "Programa para el control de la contaminación atmosférica en el Area Metropolitana". Intec-Chile, Servicio Nacional de Salud, Municipalidades del Gran Santiago.
- ENSR, Intec-Chile y Universidad de Chile, 1990: "Desarrollo de un modelo de dispersión de contaminantes". Proyecto desarrollado para la Intendencia de la Región Metropolitana. Informe Final.
- IASA, 1981: "Estudio de impuestos a la emisión de contaminantes del aire y agua en la Región Metropolitana", Instituto de Análisis de Sistemas Aplicados para el Desarrollo - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Proyecto contratado por la Oficina de Planificación Nacional.
- Intec-Chile y Universidad de Chile, 1990: "Sistema de derechos de emisión". Proyecto desarrollado para la Intendencia de la Región Metropolitana. Informe Final.
- Universidad de Chile, 1985: "Estudio de caracterizaciones físicas y químicas de partículas en suspensión en la Región Metropolitana". Proyecto desarrollado para el Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana. Informe Final.



## CAPITULO 2 FACTORES METEOROLOGICOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO

*Pablo Ulriksen U.*

Introducción	39
Características de la cuenca de Santiago	40
Circulación atmosférica regional	40
Información meteorológica en la cuenca	43
Flujos locales en la cuenca de Santiago	44
Capas atmosféricas cercanas a la superficie	47
Efectos urbanos	51
Transporte y dispersión de contaminantes en la cuenca	53
Condiciones meteorológicas asociadas a episodios de contaminación	54
Conclusiones	59
Referencias bibliográficas	60



■ **Pablo Ulriksen Ugarte**  
 Ingeniero Civil (egresado),  
 Universidad de Chile.  
 Cursos de postgrado en Difusión  
 Atmosférica, Dinámica de Geofluidos  
 y otros.  
 Especialista en meteorología  
 y contaminación atmosférica.  
 Ha desarrollado estudios y participado  
 en proyectos aplicados a problemas  
 de contaminación atmosférica,  
 en Santiago, en fundiciones de cobre  
 y otros lugares, en temas relacionados  
 con mediciones y análisis de factores  
 meteorológicos, caracterización de  
 contaminantes, evaluación de emisiones,  
 desarrollo y aplicación de modelos de  
 dispersión de contaminantes y otros.  
 Profesor Asociado, Departamento de  
 Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas  
 y Matemáticas, Universidad de Chile.  
 Consultor de diferentes organismos  
 e instituciones.



## INTRODUCCION

Los principales factores meteorológicos que influyen en el transporte y dispersión de contaminantes son la velocidad y dirección del viento, el nivel de turbulencia presente en la atmósfera y la existencia de limitaciones a la dispersión vertical por efecto de capas de inversión térmica.)

El transporte de contaminantes de un punto a otro está determinado por el movimiento medio del aire, es decir, por los flujos atmosféricos dentro de la región de interés. En zonas de relieve pronunciado con valles y cordilleras, como la cuenca de Santiago, los flujos de aire suelen ser complejos.

[Además del transporte de contaminantes asociado al movimiento medio del aire, se produce dispersión por la turbulencia presente en el fluido. La intensidad de la turbulencia atmosférica depende de las interacciones del aire con la superficie, especialmente de sus características de rugosidad y de los intercambios de calor entre el suelo y la atmósfera. En zonas de relieve complejo y de rugosidad elevada, como el caso de áreas urbanas, se desarrollan mayores niveles de turbulencia que en zonas planas y lisas.]

[La dispersión vertical de contaminantes se realiza usualmente en una capa comprendida entre la superficie y una altura determinada por factores termodinámicos. Por ejemplo, la presencia de una capa de inversión térmica elevada, produce una barrera a la dispersión vertical de contaminantes.] Este tipo de fenómeno es frecuente en el área de Santiago. La ocurrencia de episodios de contaminación está asociada a condiciones meteorológicas adversas, correspondientes a poca ventilación de la cuenca, con una capa de mezcla reducida y vientos débiles.

[Simultáneamente con el desplazamiento y mezcla de contaminantes con el aire del entorno, se producen transformaciones químicas y físicas que afectan la composición y las concentraciones. Los factores meteorológicos más impor-

tantes en estos fenómenos incluyen la temperatura del aire, la humedad atmosférica, la intensidad de la radiación solar y las precipitaciones.]



## CARACTERISTICAS DE LA CUENCA DE SANTIAGO

La ciudad de Santiago está ubicada en la depresión intermedia de la zona central de Chile, en la cuenca del río Maipo. La ciudad se sitúa en un área al pie de la cordillera de los Andes, correspondiente a la zona de relleno sedimentario de los ríos Mapocho y Maipo, extendiéndose aproximadamente entre las cotas 400 m y 900 m sobre el nivel del mar.

La cuenca de Santiago está limitada al oriente por los faldeos precordilleranos de la cordillera de los Andes, con cerros que superan los 3200 m (Cerro Ramón). Por el oeste, la cordillera de la Costa alcanza alturas sobre 1500 m, siendo interrumpida por el valle del río Maipo, que abre la cuenca hacia el sector suroeste. Más al sur, el macizo de Alhué (Cerro Cantillana) supera los 2000 m de altitud.

El cordón de cerros de Chacabuco cierra la cuenca por el norte. Por el sur, el cordón de cerros de Angostura de Paine separa la cuenca de la depresión central que se desarrolla hacia el sur.

La cuenca tiene una extensión relativamente plana de 70 a 80 km en la dirección norte-sur y de 30 a 40 km en sentido este-oeste. Varios cerros de tipo isla se elevan sobre la llanura, como Lonquén (1028 m), Chena (950 m) y Renca (903 m). Por el sector nororiente de la ciudad, penetra una cadena de cerros formada por el Manquehue (1650 m) y el San Cristóbal (880 m). Por el sur, el cordón de cerros de los Ratones (Morro El Cardo, 1468 m), enmarca la sub-cuenca de Pirque.

Por el sector nororiente de la ciudad, el río Mapocho y el estero del Arrayán dan origen a valles cordilleranos que ayudan a la ventilación de la ciudad. Por el sector sur, el río Maipo fluye desde un valle cordillerano encajonado.

En el capítulo 3 se incluye una figura con el relieve del valle de Santiago. Los cerros que rodean a la planicie central imponen fuertes restricciones a la renovación del aire dentro de la cuenca.



## CIRCULACION ATMOSFERICA REGIONAL

Las condiciones meteorológicas imperantes en la cuenca de Santiago están determinadas por fenómenos de diferentes escalas, desde la planetaria, hasta los efectos locales propios del relieve y de las características de la superficie existentes en el área.

La Figura 2.1 muestra un esquema de la circulación general de la atmósfera, en un corte orientado N-S, entre el ecuador y el polo. Se pueden distinguir dos grandes tipos de circulación: una celda de convección entre el ecuador y 30 grados; y una zona ubicada entre 40 y 60 grados de latitud, donde predomina la actividad del frente polar.

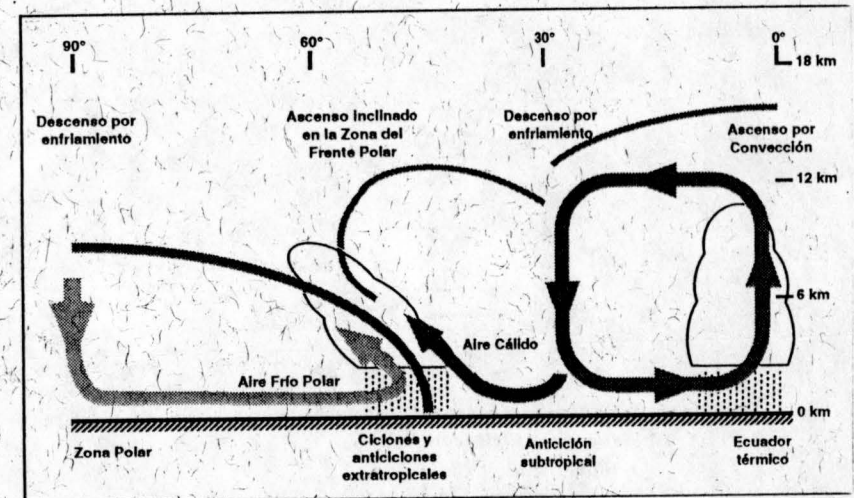


Figura N° 2.1: Esquema de la circulación general de la atmósfera.

El calentamiento superficial en la zona tropical, genera ascenso del aire caliente, dando origen a la formación de abundante nubosidad y precipitaciones intensas. El aire asciende hasta el tope de la tropósfera, a unos 15 km de altitud en la zona ecuatorial. Al perder empuje, el aire deja de ascender y fluye a gran altura desde la zona tropical hacia los polos, enfriándose lentamente por pérdida de calor por radiación hacia el espacio. Alrededor de los 30 grados de latitud, se produce el descenso hacia la superficie. En este proceso, el aire se comprime y aumenta de temperatura, dando origen a una masa de aire cálido y seco. La circulación convectiva se cierra con el flujo cerca de la superficie, desde las zonas subtropicales hacia el ecuador, donde el aire cálido va incorporando humedad por evaporación desde el océano y continentes, aportando el vapor de agua que da origen a nubosidad y precipitaciones en la zona ecuatorial.



Desde los 30 grados hacia el Polo Sur, la circulación general de la atmósfera se caracteriza por irrupciones de masas cálidas hacia el polo y por irrupciones de masas frías desde zonas polares hacia las áreas subtropicales. En la zona de encuentro de estas masas de aire, se concentran las variaciones de propiedades entre una masa y otra. Presenta una gran variabilidad en su posición geográfica, penetrando hacia latitudes subtropicales o retrocediendo hacia latitudes polares, según predominen las irrupciones de uno u otro tipo de masa de aire. Esta zona de transición entre masas de aire es denominada "frente polar". A lo largo de ella se producen procesos de mezcla caracterizados por el desarrollo de circulaciones en forma de torbellinos horizontales de grandes dimensiones, denominados ciclones extratropicales o depresiones asociadas al frente polar. A estos sistemas meteorológicos se asocia el desarrollo de nubosidad y la ocurrencia de abundantes precipitaciones, acompañadas de vientos fuertes y tormentas. En la zona afectada por estos procesos, se suceden condiciones de mal tiempo, durante el paso de los frentes, separadas por condiciones de buen tiempo, durante los períodos en que predomina una masa de aire sobre la región. Las áreas afectadas por los sistemas asociados al frente polar, muestran gran variabilidad en el tiempo en sus características meteorológicas.

Las grandes configuraciones de la circulación de la atmósfera presentan un ciclo anual. La zona de mayor radiación solar se mueve de un hemisferio a otro, lo que va acompañado de un desplazamiento general de los sistemas meteorológicos.

En el área de la rama descendente de la circulación convectiva, se establece en la superficie un sistema de altas presiones. Frente a las costas sudamericanas, se observa un gran centro de altas presiones, o anticiclón, ubicado sobre el océano. El aire sobre esa zona está en descenso lento y es seco y cálido. Sobre la superficie oceánica, en cambio, se desarrolla una masa de aire más frío y húmedo, que alcanza cerca de 1000 m de espesor en la costa de la zona central del país.

En la transición entre ambas masas de aire, se produce una capa en la cual se observa un aumento de temperatura con la altura (capa de inversión del perfil vertical de temperatura). Esta capa representa un freno a la mezcla de aire entre ambas masas: las partículas que tratan de ascender desde la capa inferior encuentran aire más cálido en su entorno, es decir, menos denso, por lo cual aparece una fuerza de empuje que tiende a devolverlas hacia abajo.

Las condiciones meteorológicas anticiclónicas predominan gran parte del año en la región central del país. Durante los meses más fríos, las perturbaciones del frente polar, que usualmente afectan la zona austral, se trasladan hacia el norte y generan irrupciones esporádicas de sistemas de mal tiempo sobre la zona central del país. Las precipitaciones se registran en forma ocasional y presentan gran irregularidad. En la región se registran en promedio unos 20 días por año con precipitaciones, concentradas preferentemente entre los meses de mayo a agosto. La Figura 2.2 muestra las distribuciones de temperaturas y precipitaciones mensuales en Santiago. El clima de la zona corresponde al tipo templado-cálido, con estación lluviosa corta (4 meses) en invierno.

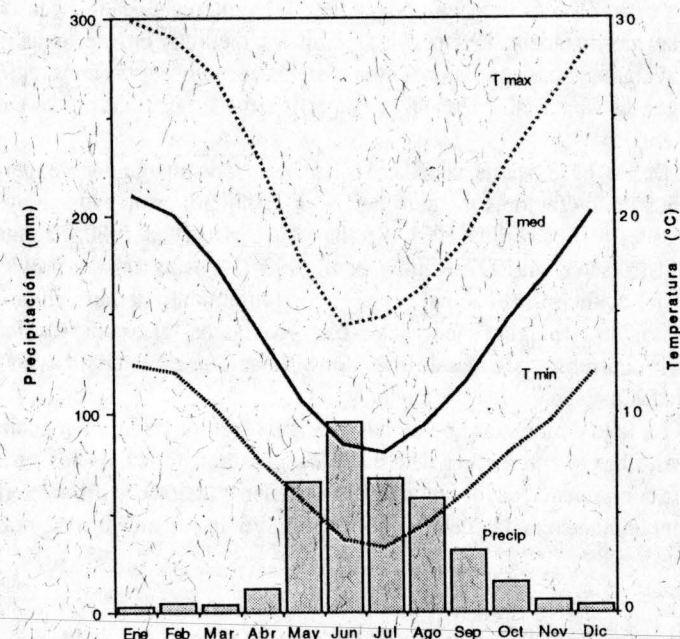


Figura N° 2.2: (Variación de los promedios mensuales de precipitación y temperatura] de Santiago.



## INFORMACION METEOROLOGICA EN LA CUENCA

Las observaciones meteorológicas en Santiago comienzan el siglo pasado. Sin embargo, [la información obtenida en las estaciones de las redes nacionales, orientadas a fines aeronáuticos, hidrológicos y otros, no es siempre utilizable en estudios de contaminación atmosférica. Esto ocurre especialmente en el caso del viento, donde interesan las velocidades elevadas para la prevención de riesgos aeronáuticos, mientras que en problemas de contaminación atmosférica son las velocidades más bajas las que más interesan cuando ocurre estancamiento del aire.]

En la cuenca de Santiago, se realizan mediciones meteorológicas de superficie en los aeropuertos y en algunas instituciones privadas. La red de estaciones monitorizadas de contaminantes instalada en Santiago (descrita en el Capítulo 5) también cuenta con mediciones meteorológicas.

No existen mediciones regulares de perfiles verticales de temperatura y viento.



to. La estación más cercana corresponde a Quintero, ubicada en la costa, a unos 100 km de distancia. Los perfiles verticales medidos en ese lugar no representan directamente las condiciones atmosféricas que se observan en la región, especialmente en la capa de aire cercana a la superficie que es afectada por las características de la cuenca.

Desde hace varias décadas se han realizado mediciones experimentales y estudios de los factores meteorológicos de Santiago, principalmente por un grupo universitario (Fuenzalida 1961, Rutllant 1973, Ulriksen 1980, Rutllant y Salinas 1983, Ulriksen et al. 1992, Rutllant et al. 1993). De estos trabajos proviene la mayor parte del conocimiento actual sobre el comportamiento del aire en la cuenca y las características de algunos fenómenos meteorológicos, tales como los flujos atmosféricos, la ocurrencia de capas de inversión térmica y las características meteorológicas asociadas a episodios de contaminación.

[La falta de información meteorológica, obtenida en forma regular y adecuada para estudiar los problemas de contaminación atmosférica, es una seria limitación para la comprensión de los fenómenos que tienen relación con el transporte y difusión de contaminantes en la cuenca y para el estudio de sus transformaciones.]

## FLUJOS LOCALES EN LA CUENCA DE SANTIAGO

Debido al predominio de las condiciones anticiclónicas en la región, el forzamiento del flujo de aire por los sistemas meteorológicos de gran escala es débil. La ventilación de la cuenca se produce principalmente por un sistema de brisas que se genera localmente.

El mecanismo principal que produce movimiento de aire en la cuenca es el calentamiento de la superficie. Durante el día, se desarrollan brisas que soplan por los valles hacia arriba, alcanzando su mayor intensidad durante la tarde. Durante la noche, el enfriamiento de la superficie, especialmente en cerros y laderas, produce una capa delgada de aire más denso que se desliza pendiente abajo, canalizándose por los valles hacia la cuenca. La brisa nocturna es en general más débil que el flujo diurno y presenta direcciones contrarias.

En los meses de invierno, el flujo de aire dentro de la cuenca es mucho más débil que en verano, debido a la menor disponibilidad de radiación solar. Durante el invierno, las velocidades medias en las tardes en el centro de Santiago son cercanas a 2 m/s, mientras que en verano alcanzan valores del orden de 5 m/s, entre las 16 y 19 horas. La brisa nocturna es mucho más débil; entre 00 y 07 horas las velocidades medias están comprendidas entre 1.0 y 1.5 m/s (Guzmán 1984). La Figura 2.3 muestra las variaciones diarias de velocidades, para distintas épocas del año.

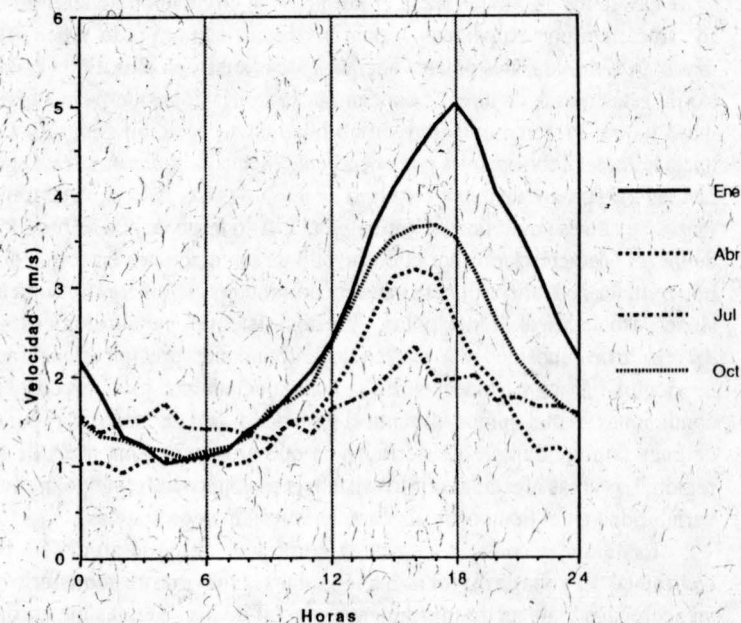


Figura N° 2.3: Variaciones diarias de la velocidad del viento en Santiago, en cuatro meses del año.

La Figura 2.4 presenta las direcciones predominantes del viento en el área central de Santiago a lo largo del día, para diferentes meses del año. En los meses de invierno, se observa el predominio de flujo del este durante la noche, indicando el efecto de la brisa que descende de la cordillera hacia la ciudad. A partir del mediodía y en las tardes, se desarrolla un flujo de dirección predominante del suroeste. Los meses de verano muestran que la brisa diurna predomina aún hasta entrada la noche, puesto que el calentamiento diurno da origen a una brisa más intensa y a procesos de convección más vigorosos, que tardan más tiempo en decaer. Durante los meses de verano, el flujo del suroeste va cambiando a flujo desde el sur al avanzar la tarde, mostrando la desviación por efecto de la rotación terrestre (efecto de Coriolis), fenómeno que se percibe cuando el flujo es más intenso y de mayor duración.

Los mapas de la Figura 2.5 muestran las direcciones predominantes observadas en diferentes lugares de la cuenca durante invierno y verano, para el flujo diurno (condiciones de la tarde) y para el flujo nocturno. Las observaciones corresponden a las estaciones de la red de monitoreo de contaminantes de Santiago y a otros lugares adicionales que contaron con mediciones durante algunos meses (ENSR et al. 1990). En la tarde, durante la época de invierno (Figura 2.5 a), predomina el flujo del suroeste en toda el área; el sector norponiente muestra una dirección más cercana a sur. En la noche (Figura 2.5 b), el aire escurre siguiendo las pendientes de la cuenca, hacia la



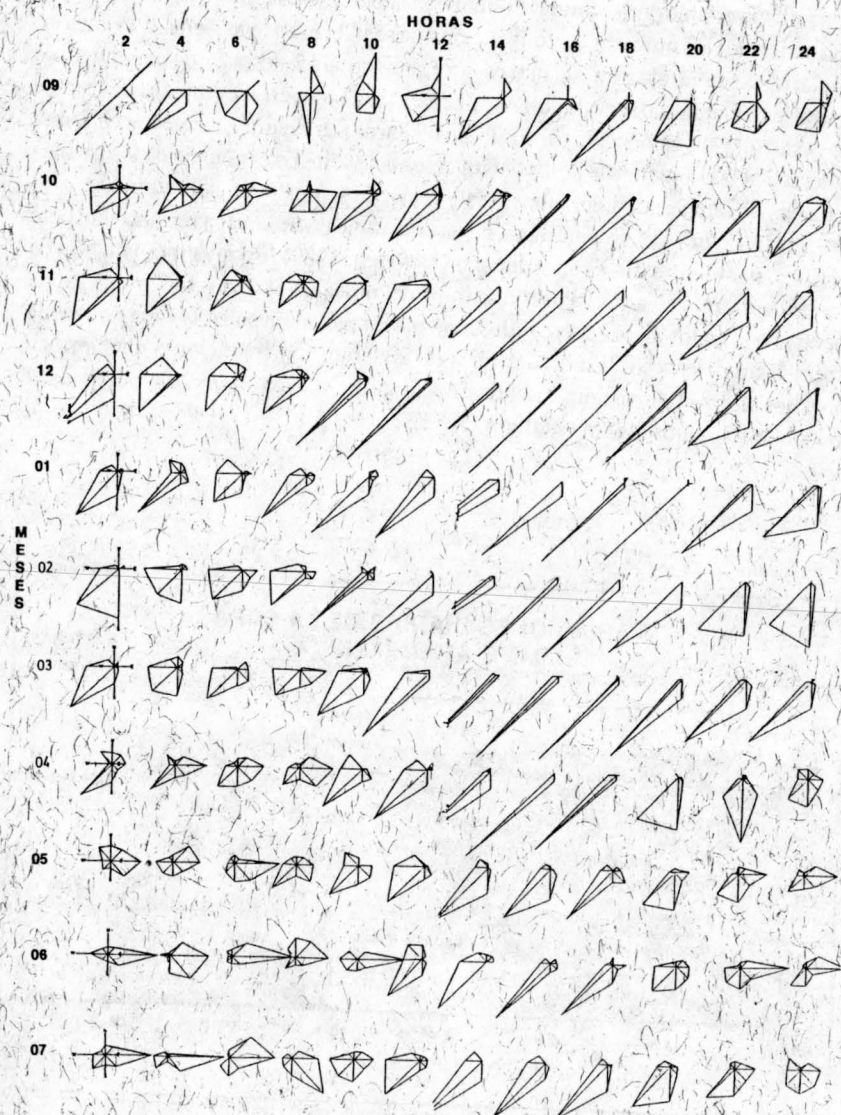


Figura N° 2.4: Rosas de direcciones de viento observadas en Santiago a diferentes horas del día, para el período septiembre 1982 - julio 1983. Los diagramas muestran las frecuencias de ocurrencia de diferentes direcciones desde donde proviene el viento.

salida por el sector surponiente. A los pies de la cordillera, en el sector nororiente, el flujo muestra direcciones del noreste. En la zona del cajón del río Maipo, el flujo es del este, mientras que en el sector de Bático, al norte de la ciudad, el flujo predominante es del norte.

En verano, las direcciones predominantes durante la tarde (Figura 2.5 c) son suroeste en toda la ciudad y sur en el sector norponiente. En la noche (Figura 2.5 d), el flujo está poco organizado, excepto en el sector nororiente de la ciudad donde el flujo del noreste muestra el efecto del escurrimiento ladera abajo desde la cordillera.

Hacia el sur de la ciudad, en el sector de El Principal de Pirque, mediciones realizadas durante un período corto de invierno muestran que la dirección predominante durante el día es desde el noroeste, mientras que en la noche es desde el sureste. Estos resultados indican que en ese sector predomina el efecto de la brisa ladera arriba durante el día y ladera abajo en la noche, en los meses más fríos, cuando el flujo general en la cuenca no es muy intenso.



## CAPAS ATMOSFERICAS CERCANAS A LA SUPERFICIE

[Las interacciones entre la atmósfera y la superficie producen diversos efectos sobre la capa de aire cercana a ella. Se observa un perfil vertical de velocidades, con valores crecientes a medida que aumenta la distancia a la superficie. Por otra parte, el calentamiento del suelo durante el día y el enfriamiento durante la noche, afectan a la atmósfera cercana. La capa que muestra las influencias de la interacción con la superficie se denomina "capa límite atmosférica". Su espesor puede estar comprendido entre algunos metros (en noches con muy poco viento) y más de 1 km (en tardes soleadas).]

[La atmósfera tiene muy poca viscosidad molecular, por lo que su movimiento es turbulento (excepto en una capa muy delgada pegada a la superficie, que presenta escurrimiento laminar). La mezcla de contaminantes con el aire del entorno depende del grado de turbulencia existente en la atmósfera.]

[El escurrimiento del aire es influenciado por la rugosidad de la superficie. En las capas cercanas al suelo se produce turbulencia de origen mecánico por este efecto. La turbulencia atmosférica es incrementada durante las horas de mayor calentamiento por los procesos de convección, que generan corrientes ascendentes y descendentes y dan origen a una capa de aire bien mezclado, cuyo espesor va aumentando durante el día. En la noche, el enfriamiento de la superficie se transfiere a las capas de aire cercanas al suelo, originando una condición de estabilidad que conduce a la disminución de los movimientos verticales y por lo tanto, a la reducción de los procesos de mezcla. De esta forma, la capa límite atmosférica presenta variaciones diarias importantes, tanto en su espesor como en los niveles de mezcla turbulenta presentes en ella.]





Figura N° 2.5: Direcciones predominantes del viento observadas en Santiago:  
a) tardes de invierno, b) noches de invierno, c) tardes de verano, d) noches de verano.

La capa estable que se produce durante la noche, es destruida desde la superficie hacia arriba por los procesos de convección que se inician en la mañana. Esta capa de mezcla convectiva alcanza su mayor profundidad algo después de las horas de máximo calentamiento superficial. Al ponerse el sol, la superficie empieza a enfriarse y se desarrolla nuevamente la capa estable nocturna. La Figura 2.6 muestra en forma esquemática la evolución de la atmósfera cerca del suelo. La evolución de los perfiles verticales de temperatura durante el día y la noche se ilustra en la Figura 2.7.

En la Figura 2.8 se presentan las alturas típicas de la capa de mezcla sobre Santiago, para diferentes épocas del año (Ulriksen, 1980). [En invierno, la altura de la capa de mezcla alcanza valores máximos del orden de 500 m sobre la superficie, mientras que en los meses más cálidos, con mayor radiación solar, la capa de mezcla supera 1 km de espesor. En días críticos de invierno, con condiciones que llevan a episodios de contaminación, la altura máxima de la capa de mezcla puede estar limitada a sólo unos 300 m (Rutllant, 1973).]

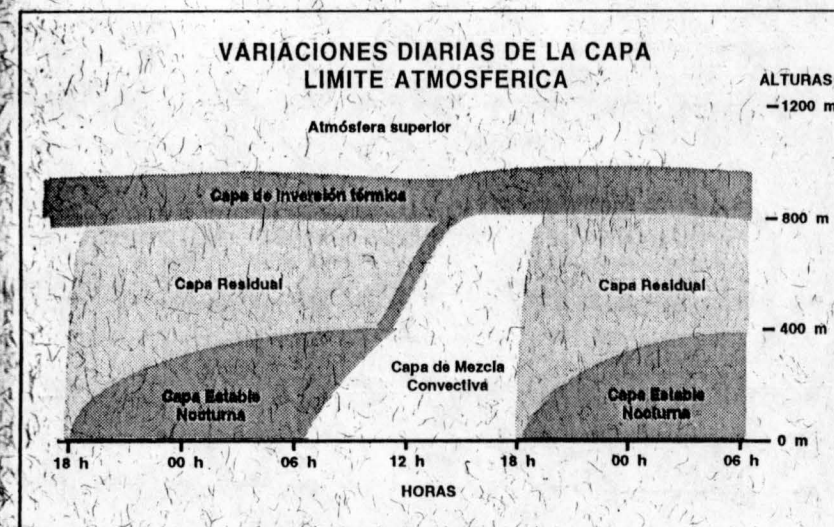


Figura N° 2.6: Variaciones diarias típicas de la capa límite atmosférica.



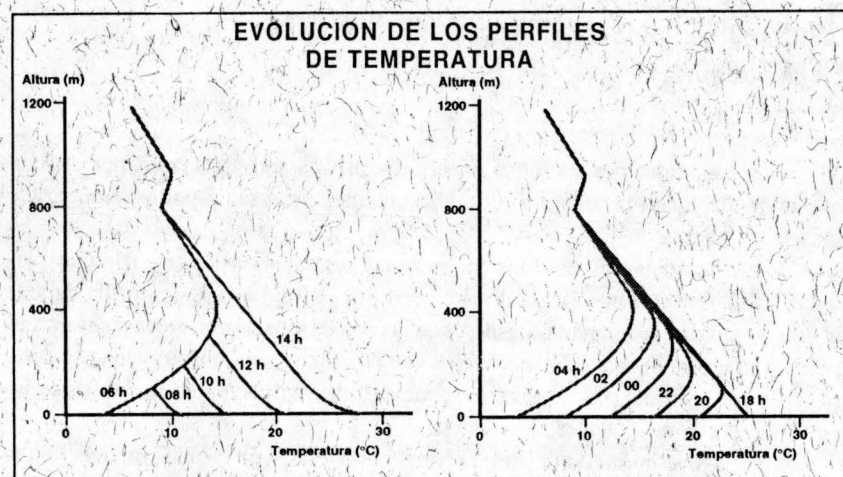


Figura N° 2.7: Evolución diaria de los perfiles verticales de temperatura en la capa límite atmosférica.

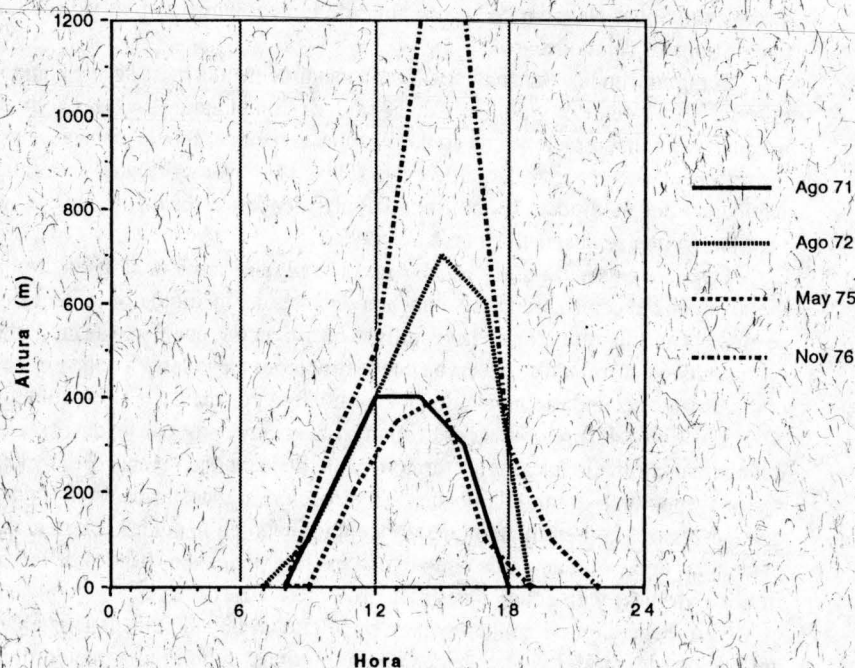


Figura N° 2.8: Variaciones medias diarias de la altura de la capa de mezcla observadas en Santiago.

## E EFECTOS URBANOS

La presencia de la ciudad modifica de diversas maneras, las condiciones atmosféricas naturales de la cuenca.

[Las características de la superficie cambian notablemente. Las construcciones alteran la rugosidad natural, la humedad disponible en el suelo y el balance de energía en la superficie, dando lugar a la aparición de una capa atmosférica urbana que suele ser más seca y cálida que el entorno.]

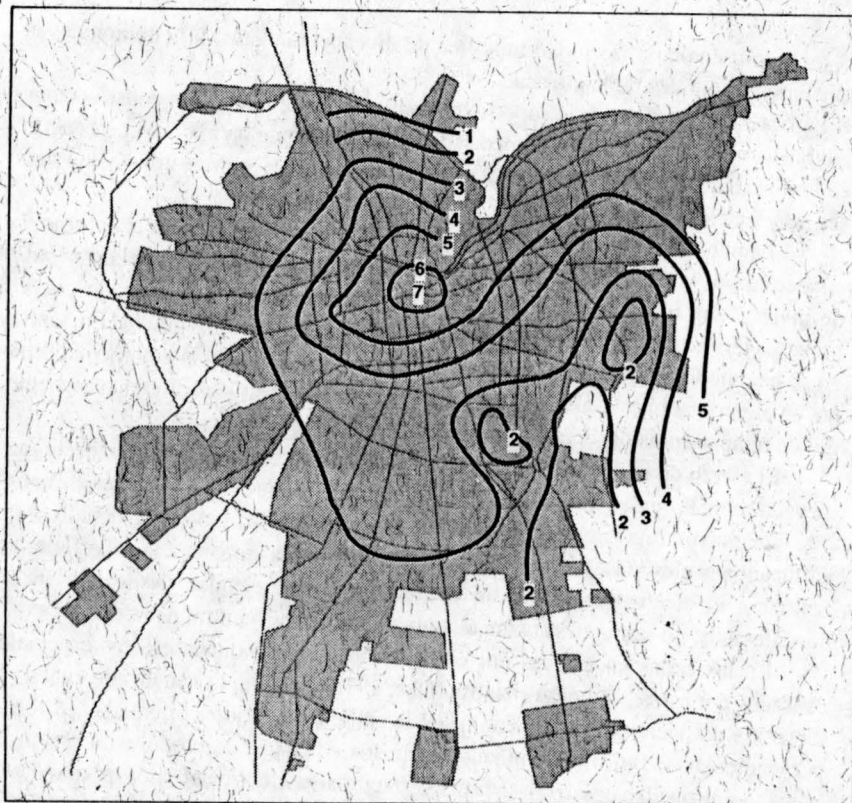
[El aumento de la temperatura dentro de la ciudad con respecto al entorno, se conoce como "isla térmica" y se manifiesta especialmente en las noches despejadas de invierno.] El calor guardado en la ciudad durante el día y el aportado por los procesos térmicos, producen diferencias de temperatura de varios grados. En Santiago se han medido diferencias mayores a 10°C entre el centro y el entorno suburbano, en algunas noches (Salinas, 1982). La Figura 2.9 muestra las diferencias promedio de temperaturas observadas en noches despejadas de invierno.

El efecto de isla térmica tiende a producir una altura de capa de mezcla más elevada sobre la ciudad que en el entorno y un flujo débil que converge hacia el centro.

La mayor rugosidad superficial en el centro de las ciudades, debido a las edificaciones elevadas, frena el flujo de aire en la capa cercana a la superficie. En Santiago, el efecto de los vientos nocturnos que descienden desde las laderas cordilleranas, no se manifiesta tan claramente en el área central de la ciudad.

En las calles encerradas por edificios altos, se producen efectos especiales causados por estos "cajones urbanos" (Oke, 1978). El flujo es canalizado cuando la dirección del viento es cercana al eje de la calle. En las calles orientadas en forma perpendicular al flujo predominante sobre los edificios, se produce un efecto de bloqueo y se pueden desarrollar vórtices estacionarios dentro del cajón urbano. Estos fenómenos son complicados además por el efecto del balance de energía superficial: {aquellas paredes que reciben buena insolación tienden a generar corrientes convectivas ascendentes, mientras que las que están en sombra, pueden originar efectos de enfriamiento y corrientes descendentes.}





**Figura N° 2.9:** Efecto de isla térmica en Santiago. Las isolíneas muestran las diferencias de temperatura con respecto al entorno.

## TRANSPORTE Y DISPERSION DE CONTAMINANTES EN LA CUENCA

Los contaminantes emitidos en el área urbana son arrastrados por el flujo que se desarrolla en la cuenca y, simultáneamente, dispersados por los procesos de mezcla turbulenta.

Los contaminantes emitidos en las zonas central y surponiente son transportados hacia el sector nororiente de la ciudad por el flujo que se desarrolla durante el día. A medida que aumenta el espesor de la capa de mezcla durante la mañana, crece el volumen en el cual se dispersan los contaminantes. Simultáneamente, se desarrolla la brisa diurna, por lo cual la capacidad de ventilación de la cuenca se incrementa por ambos factores.

Después de la puesta del sol, el flujo se invierte y desciende aire más limpio desde los faldeos cordilleranos, llevando el aire contaminado hacia la zona céntrica y poniente de la ciudad. Durante la noche, el enfriamiento de la capa cercana a la superficie reduce notablemente la dispersión vertical de contaminantes, dando lugar a concentraciones elevadas en las cercanías de fuentes emisoras fijas y de calles con mayor tránsito vehicular.

Temprano en las mañanas, se observa usualmente una masa de aire contaminado en el sector central y poniente de la ciudad. Con el aumento de las actividades urbanas, las concentraciones de contaminantes crecen durante la mañana, especialmente en el sector central donde se produce la mayor afluencia de vehículos. Alrededor del mediodía, las concentraciones tienden a disminuir, por la mayor ventilación que se desarrolla a esas horas.

Las concentraciones observadas en el área nororiente de la ciudad, ubicada viento abajo del centro, tienden a aumentar después del mediodía. Simultáneamente, se observa una disminución de la visibilidad en ese sector, por efecto de las partículas en suspensión. También se observan concentraciones elevadas de ozono en esa área, contaminante secundario generado en la atmósfera por reacciones fotoquímicas.

Los flujos de aire que se desarrollan en la cuenca, originan un desplazamiento del aire contaminado hacia el sector nororiente de la ciudad durante el día y hacia el sector surponiente durante la noche. Las direcciones opuestas de estos flujos pueden dar lugar a la recirculación de aire contaminado en la ciudad. Existen algunas evidencias de acumulación de contaminantes durante los días hábiles de la semana (lunes a viernes) y en condiciones meteorológicas adversas.

La dispersión de contaminantes en la ciudad ha sido simulada mediante la aplicación de modelos numéricos, para algunas condiciones meteorológicas típicas (ENSR et al. 1990). Los resultados de las modelaciones reproducen en términos generales los patrones de flujo y las variaciones típicas a lo largo del día. Las simulaciones también han servido para detectar limitaciones de la infor-

mación relacionada con emisiones y de las mediciones de concentraciones y parámetros meteorológicos.



## CONDICIONES METEOROLÓGICAS ASOCIADAS A EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN

Las mediciones de contaminantes en la atmósfera de Santiago muestran un aumento generalizado de los contaminantes primarios, durante la época de otoño-invierno, cuando la ventilación en la cuenca es reducida. Durante los meses de invierno, el fenómeno está modulado por la ocurrencia de días de episodios, con valores elevados de concentraciones de contaminantes, y por días con muy poca contaminación, correspondientes al paso de sistemas de mal tiempo sobre la región.

Las condiciones meteorológicas que pueden conducir a episodios corresponden al desarrollo de una depresión costera (baja costera) en la zona central del país (Rutllant 1981, Rutllant et al. 1993).

En la depresión costera, que se forma entre el anticiclón del Pacífico y la cordillera, se pueden diferenciar esquemáticamente dos porciones, noroeste y sureste (Figura 2.10). Sobre el sector sureste de la baja, se induce un descenso forzado de aire desde la cordillera, dando lugar a un calentamiento del aire y descenso de la base de la inversión térmica asociada al anticiclón. La Figura 2.11 muestra una secuencia típica de perfiles verticales de temperatura observados en Quintero, durante el desarrollo de un fenómeno de este tipo.

La capa de mezcla superficial en el sector sureste de la depresión se ve reducida por este proceso de calentamiento y descenso de aire. Debido a la ocurrencia de cielos despejados y sequedad atmosférica, la radiación solar produce un aumento de las temperaturas superficiales. Simultáneamente, la humedad atmosférica disminuye.

En el sector noroeste de la baja costera, domina la advección de aire marino hacia el continente. Se suele observar un aumento de la altura de la base de la capa de inversión y penetración de la nubosidad costera hacia el interior.

La depresión costera se propaga normalmente hacia el sur, dando lugar a una secuencia de fenómenos asociada a los dos sectores de ella. El aumento de temperaturas y el descenso de humedad observados a lo largo de algunos días en Santiago, son reemplazados en los días siguientes por un enfriamiento del aire y por un aumento de la humedad atmosférica, al penetrar el aire de origen marino a la cuenca de Santiago.

La depresión costera está acompañada de vientos débiles en la cuenca de Santiago. La fuerte inversión térmica es muy efectiva en aislar la capa de mezcla superficial, del aire de la tropósfera media.

Como ejemplo de la ocurrencia de estas condiciones meteorológicas, se

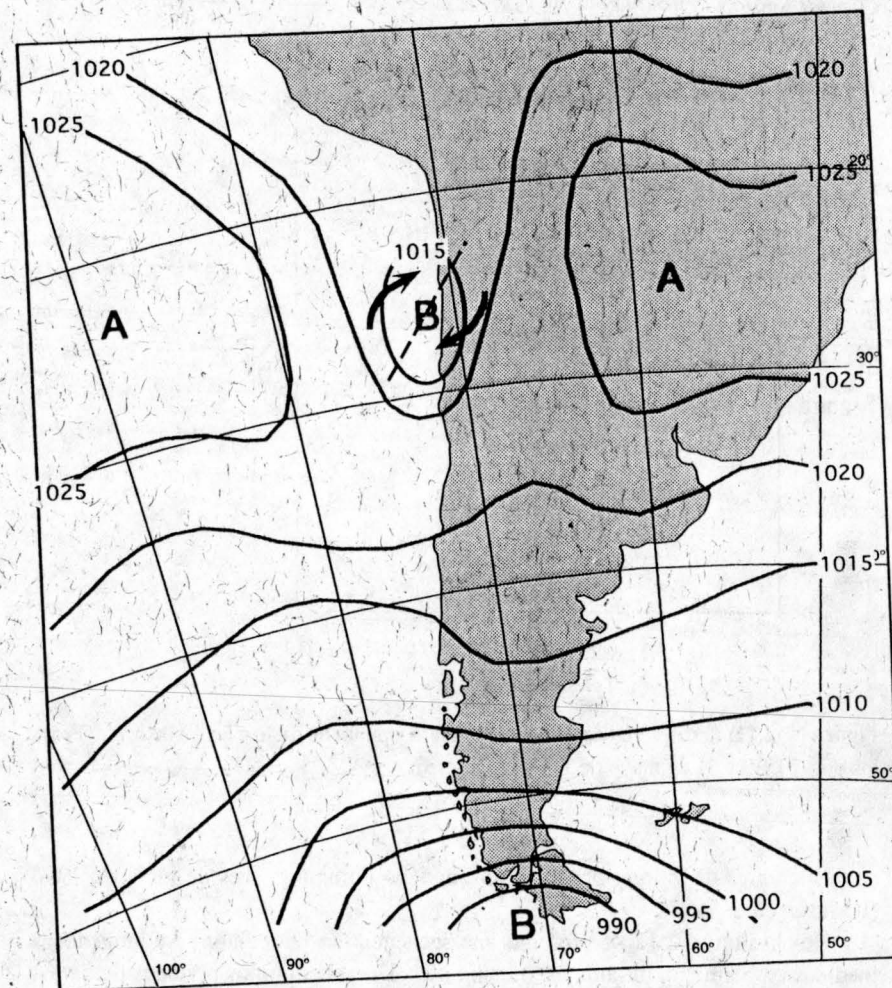


Figura N° 2.10: Ejemplo de depresión costera sobre Chile. La carta muestra las presiones a nivel del mar (en hPa) para el día 5 de agosto de 1989 a las 12:00 h TMG.



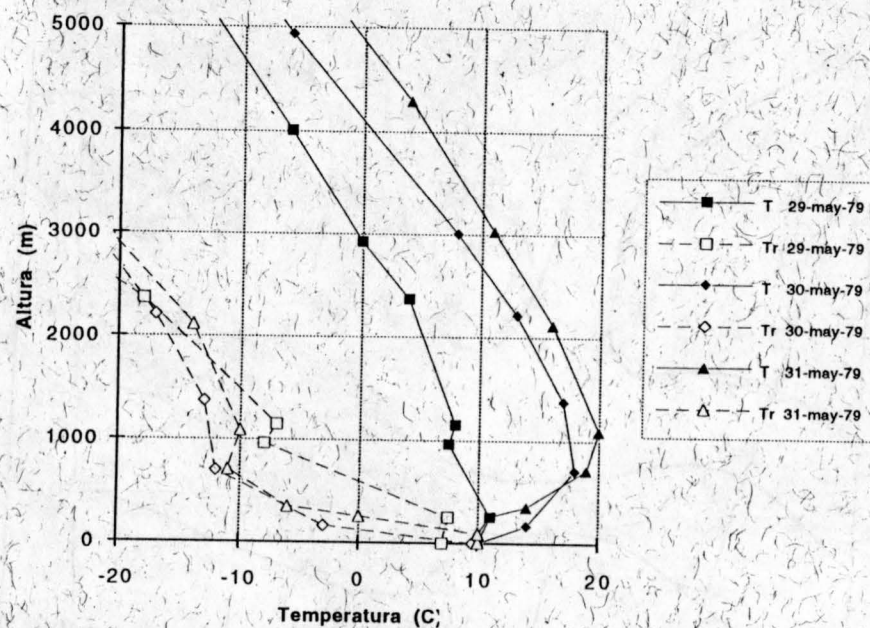


Figura N° 2.11: Perfiles verticales de temperatura y punto de rocío a las 12:00 h TMG para los días 29, 30 y 31 de mayo de 1979 en Quintero.

analizan series de valores medidos en Santiago durante el mes de junio de 1990 (Ulriksen et al. 1992).

En la Figura 2.12 se presenta una secuencia de temperaturas y humedades medidas en Santiago, durante ese mismo mes. Durante algunos períodos de varios días seguidos, las temperaturas muestran un aumento, especialmente en la magnitud del ciclo diario. Simultáneamente, la humedad atmosférica indica un secamiento del aire. Los períodos más definidos ocurren entre los días 4 a 8, 18 a 21 y 24 a 28 de junio. En esos días se observan condiciones de cielos despejados, asociados al desarrollo de depresiones costeras. Esos períodos finalizan con un cambio en las condiciones meteorológicas, con disminución de temperaturas y aumento de la humedad atmosférica, características de días nublados. En algunas ocasiones, estas condiciones se asocian al paso de sistemas de mal tiempo y precipitaciones. En los días 3, 17 a 18 y 22 a 23 de junio se observan estas condiciones.

En la Figura 2.12 también se muestran las mediciones de concentraciones de monóxido de carbono (CO) en las estaciones A y B de la red de monitoreo de Santiago. Se observa la variabilidad de niveles asociada a los ciclos diarios, junto con períodos de varios días de duración en que las concentraciones son elevadas. Los promedios móviles de las concentraciones permiten estudiar las tendencias de los valores

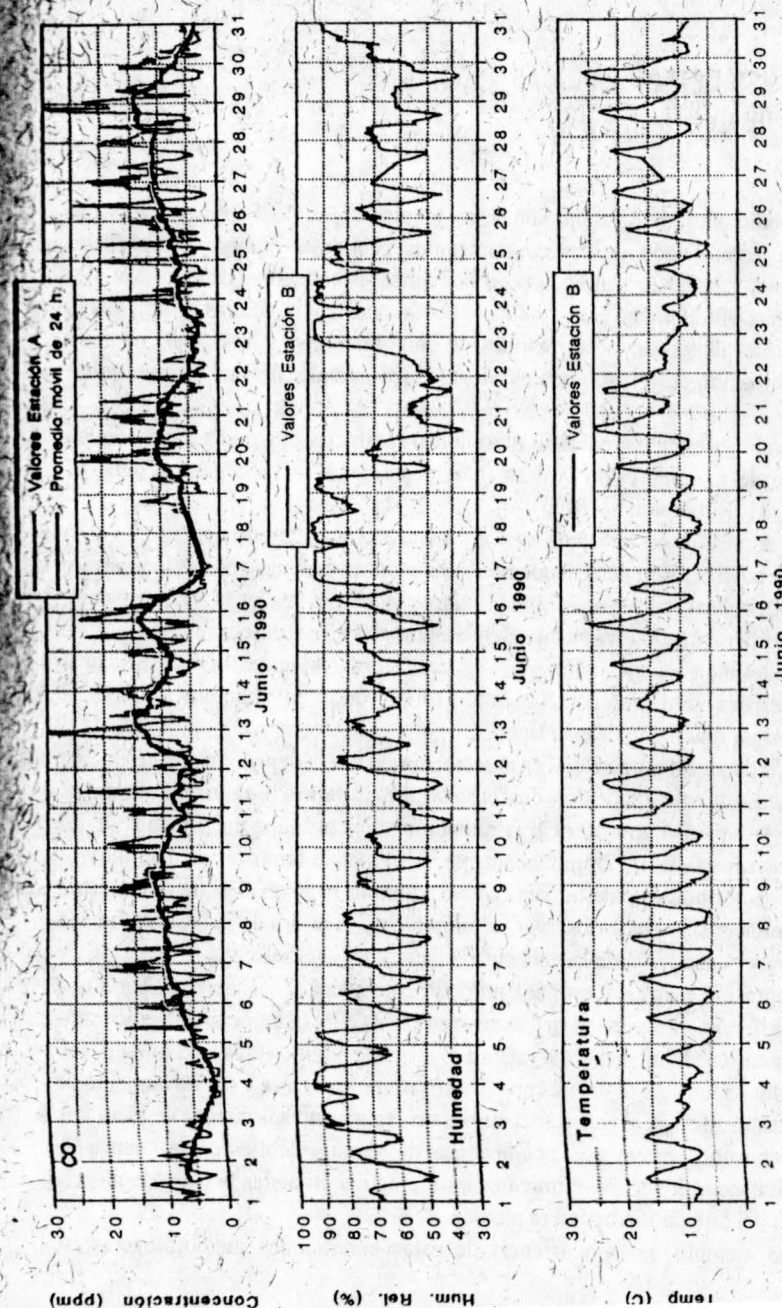


Figura N° 2.12: Series de valores horarios de monóxido de carbono (CO), temperatura y humedad medidas en Santiago durante junio de 1990.

diarios. Los niveles medios más altos de CO se observan en los períodos del 6 al 10, 12 al 15, 19 al 20 y 26 al 29 de junio. Las series muestran períodos de varios días de duración durante los cuales las concentraciones aumentan en forma continua, especialmente entre el 4 y 8 y entre el 23 y 28 de junio, concordantes con el aumento de temperatura y disminución de la humedad atmosférica. Las concentraciones de CO más bajas del mes se observan en días con disminución de temperatura y gran humedad atmosférica.

La frecuencia de ocurrencia de las condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de contaminantes en la zona central de Chile han sido estudiadas a través de un análisis estadístico de los perfiles verticales de temperatura y vientos realizados diariamente en Quintero para un período de diez años (Rutllant y Salinas 1983). Los resultados muestran que el 77% de los casos analizados presentan inversiones térmicas que se asocian a la presencia del anticiclón del Pacífico. Este conjunto de observaciones incluye inversiones térmicas muy intensas, cercanas a la superficie (con aumento de temperatura a través de la capa de inversión de más de 10 °C y base de la capa ubicada a una altura entre 0 y 250 m sobre la superficie), que son características de las condiciones de episodios en Santiago, donde se presenta una capa de mezcla muy poco desarrollada y vientos débiles.

La frecuencia de ocurrencia de estas inversiones superficiales intensas es aproximadamente uno de cada 20 días al año, alcanzándose en otoño una probabilidad doble de ocurrencia (un día de cada 10). La máxima ocurrencia de las inversiones superficiales fuertes se presenta en el período comprendido entre abril y agosto, con una ligera disminución en los meses de junio y julio, en que la actividad frontal alcanza en promedio su máxima ocurrencia. Del total de días con inversiones superficiales fuertes, el 33% se agrupa en dos o más días consecutivos.

Durante la ocurrencia de inversiones superficiales fuertes, la base de la capa de inversión se ubica en la superficie en un 97% de los casos analizados. El tope de la capa de inversión está comprendida entre 600 m y 1200 m en un 75% de los casos, lo que muestra el gran espesor que alcanza esta capa estable. El análisis estadístico de desviaciones con respecto a los promedios mensuales muestra que más del 75% de los casos corresponden a la ocurrencia de bajas presiones a nivel de superficie, componente de viento del este a 1500 m (aproximadamente) y aumento de temperatura a ese nivel.



## CONCLUSIONES

La ciudad de Santiago está ubicada en una cuenca atmosférica encerrada por cerros altos. Los flujos al interior de la cuenca se producen fundamentalmente por el desarrollo de brisas de valles y montañas. Las condiciones naturales de la cuenca son de poca ventilación, por lo cual los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera deben mantenerse bajos.

La cuenca de Santiago está afectada por condiciones meteorológicas de escala regional, que llevan con frecuencia a la ocurrencia de episodios de contaminación atmosférica en la época de otoño-invierno. Durante estas ocasiones, la ventilación en la cuenca es muy reducida, con vientos débiles y capa de mezcla poco desarrollada.

Por otra parte, los flujos en la cuenca alternan direcciones entre el día y la noche, lo que lleva a la recirculación del aire y la posible acumulación de contaminantes.

La solución al problema actual de contaminación atmosférica de Santiago debe estar basada en la disminución importante de las emisiones. Debido a la capacidad reducida de la cuenca para dispersar contaminantes, se debe mantener un monitoreo permanente de los niveles de contaminación, de los factores meteorológicos que inciden en ellos y de las medidas de reducción que se implementen.





## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ENSR, Intec-Chile y Universidad de Chile, 1990: "Desarrollo de un modelo de dispersión de contaminantes". Proyecto desarrollado para la Intendencia de la Región Metropolitana. Informe Final.
- Fuenzalida H., 1961: "Estudio sobre la contaminación atmosférica de la ciudad de Santiago". Memoria de Título, Ingeniero Civil Industrial, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Guzmán V., E., 1984: "Estudio experimental de la estabilidad atmosférica en Santiago mediante uso de un anemómetro sensible". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Oke T.R., 1978: "Boundary Layer Climates". Methuen & Co. Ltd, London. 372 p.
- Rutllant, J., 1973: "Factores meteorológicos en la contaminación atmosférica de Santiago. Resultados de las mediciones 1971-72". Publicación No. 164, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Rutllant, J., 1981: "Subsistencia forzada sobre ladera andina occidental y su relación con un episodio de contaminación atmosférica en Santiago". Tralka, 2 (1): 57-76.
- Rutllant J. y H. Salinas, 1983: "Caracterización meteorológica de situaciones de alto potencial de contaminación atmosférica en Chile central". Meteorológica, Vol. XIV (1 y 2): 353-361.
- Rutllant J., R. Garreaud, E. Campos y P. Aceituno, 1993: "Meteorological air pollution potential for Santiago, Chile: towards an objective episode forecasting". Preprints, IV International Conference on Meteorology and Oceanography of the Southern Hemisphere, Hobart, Australia, Marzo 1993, Amer. Meteorol. Soc.
- Salinas F., 1982: "Estudio experimental del efecto de isla calórica en la ciudad de Santiago". Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Ulriksen P., 1980: "Variaciones diarias de la altura de la capa superficial de mezcla sobre Santiago". Tralka, 1(2): 143-151.
- Ulriksen P., B. Rosenbluth y R. Muñoz, 1992: "Caracterización de episodios de contaminación atmosférica en Santiago y su pronóstico mediante modelos estocásticos". Informe Final Proyecto FONDECYT 1192-91, Marzo 1992.



### CAPITULO 3 LA CIUDAD

María Bertrand S.  
Hugo Romero A.

La ciudad	63
Consecuencias de la localización de la ciudad	66
Crecimiento en expansión	67
Modalidad de crecimiento	70
Distribución de los usos del suelo	73
Conclusiones	83
Referencias bibliográficas	84

■ **María Bertrand Suazo**

*Arquitecto, Doctora en Urbanismo  
(Institut d'Urbanisme, Université  
de París).*

*Profesora Asociada de la Facultad  
de Arquitectura y Urbanismo  
de la Universidad de Chile,  
cursos de pre y post Grado.*

*Investigadora, evaluadora y revisora  
de proyectos FONDECYT.*

*Asesora Planificación Regional,  
Planificación de Sistemas de Salud  
y Planes Maestros de Turismo.*

*Miembro Town & Country Planning  
Association, London.*

*Miembro del Laboratoire des Théories  
Urbaines en Pays Développés.  
Institut d'Urbanisme. París.*

■ **Hugo Romero Aravena**

*Master of Sciences en Manejo  
de Recursos Territoriales,  
Granfield Institute of Technology,  
Inglaterra (1979).*

*Diplomado en Sistemas de Información  
Geográfica, Ecole Polytechnique Fédérale  
de Lausanne, Suiza (1990).*

*Ph.D (c), Instituto de Geografía Física  
de la Universidad de Berna, Suiza.*

*Editor y Autor de la Colección  
Geografía de Chile del Instituto  
Geográfico Militar.*

*Miembro Titular de la Sociedad  
de Ciencias Geográficas de Chile,  
de Conference of Latinoamericanists  
Geographers y Comisión de Geoecología  
de Montañas de la Unión Geográfica  
Internacional.*

*Coordinador del Programa  
de Desarrollo del Medio Ambiente  
de la Universidad de Chile.*



## LA CIUDAD

La contaminación atmosférica en el área metropolitana de Santiago es producto del desajuste funcional entre las características del medio natural y algunas de las modalidades del proceso de planificación del desarrollo urbano. La ciudad está situada en una cuenca fluvial ubicada en latitudes subtropicales, cuyas características y procesos son escasamente conocidos por falta de mediciones y monitoreos sistemáticos. Estos procesos, significativos para la calidad de vida urbana, sin embargo, no han sido integrados a las políticas y a los instrumentos de planificación urbana, olvido que hace difícil plantear temas fundamentales como, el desarrollo sostenible en las decisiones sobre uso del suelo, densidades residenciales, límite de la superficie urbanizada.

En el presente capítulo se busca demostrar que ciertos aspectos de la planificación del desarrollo urbano aplicados a la Intercomuna de Santiago, exacerbada por la Política Nacional de Desarrollo Urbano de 1979, han contribuido a acentuar y, en ocasiones, provocar la contaminación del aire en niveles cada vez más críticos, situación muchas veces agravada por la falta de coordinación de estas medidas con la de las otras instituciones que intervienen en el espacio metropolitano. Tal es el caso de la regulación de las emisiones de fuentes fijas: las instituciones responsables son los Ministerios de Salud, Minería, Economía y Agricultura, así como la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM). En el caso de las fuentes móviles. Las instituciones son: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MINTRATEL), con el apoyo del de Economía y de la CEDRM para los programas de semaforización y el Ministerio de la Vivienda y Urbanismo (MINVU) y de los Municipios en el caso de licitación de calles, entre otros.

La irreversibilidad de la situación de inversiones térmicas es tal que podría



llevar al cuestionamiento de la subsistencia misma de la metrópolis, salvo aplicación de urgentes medidas paliativas derivadas de una comprensión más global y de largo plazo de los efectos ambientales de la planificación de su desarrollo urbano. De hecho, en otros países, el manejo de los niveles de contaminación del aire, pasa por la definición de políticas muy precisas referidas a índices explícitos de localización industrial, de consumo de energía domiciliar y de transporte (Local Government Management Board, 1992).

Esta consideración es importante dado que la modernización y el desarrollo económico y social pasan inevitablemente por el aumento de los desplazamientos, del parque automotriz y de los consumos de energía, situación descrita repetidamente en diferentes contextos y que es condición *sine qua non* del desarrollo, salvo opción utópica de "otro estilo", inédito en occidente (Boyden, Miller, 1981 y Ministère de l'Environnement, París, 1993).

Por otra parte, en Santiago coexisten problemas ambientales propios del subdesarrollo con aquellos característicos de un acelerado crecimiento económico. En las "dos ciudades" se observa, sin embargo, crecimiento hacia la periferia, ausencia de renovaciones de áreas interiores capaces de compensar la presión hacia los suelos agrícolas de primera calidad (Bertrand, Figueroa et al., 1991) o, en el piedemonte, hacia zonas cuyos riesgos no han sido totalmente integrados a la planificación urbana (Bertrand, et al., 1993). En el caso del Santiago "del subdesarrollo", se constata carencia de áreas verdes, importantes porcentajes de calles sin pavimentar y numerosas concentraciones de viviendas básicas. Mientras que en la "ciudad del desarrollo", bien equipada y dotada de mayor cantidad de áreas verdes, ya existe un rápido aumento del parque automotriz e incrementos en los patrones de desplazamiento y de los consumos de energía (Dockendorff et al., 1990). En otros términos, las posibilidades de control de la contaminación son más difíciles y complejas que en metrópolis exclusivamente "desarrolladas" o "subdesarrolladas". La situación es tanto más difícil en la medida que el necesario mejoramiento de la calidad de vida, debe pasar por el aumento de la movilidad, el uso intensivo de la red vial por un parque automotriz en constante aumento hacia nuevos núcleos de equipamiento, servicios y trabajo y hacia sistemas de áreas verdes de recreación cotidiana y de frecuentación masiva. Cabe hacer notar que, ya en 1989, los 4.600.000 viajes diarios en la Intercomuna generaban congestión y contaminación, a pesar de que Santiago ofrece uno de los menores índices de motorización (90 vehículos cada 1.000 habitantes) y que, aproximadamente, 1.900.000 viajes se realizan a pie por falta de capacidad económica (ESTRAUS, 1990).

En este contexto, la revisión de la localización de "fuentes fijas" de contaminación atmosférica y de líneas de flujo de las "fuentes móviles" sobre las que va a operar el acelerado y generalizado crecimiento del parque automotriz, muestra inconsecuencia y desajustes ambientales. Apreciaciones del Ministerio de Transporte señalan que

el parque de 12.000 vehículos de la locomoción colectiva está sobredimensionado, aproximadamente, en un 36%. De esos 12.000, sólo 3.000 presentan adecuadas condiciones de mantención. Entre 1980 y 1988, se duplicó el número de vehículos de la locomoción colectiva, y el parque automotriz incrementó en un 30%, estimándose que para el año 2000 llegue a 1 millón de vehículos (CED, 1992).

Cabe señalar, por otra parte, que este crecimiento del parque, con la congestión consiguiente, es signo de progreso social y económico y que sus tasas están aún lejos de las alcanzadas por los países desarrollados.

Las localizaciones periféricas de las industrias, de la vivienda y la centralización de los servicios y del comercio han sido tales, que generan masivos traslados cotidianos que acentúan la problemática de contaminación del aire. El desfase entre decisiones de planificación y medio natural ha sido, por lo demás, muy rápido, debido a la intensidad y velocidad del proceso de concentración urbana, que durante los últimos 40 años ha generado uno de los índices de primacía más altos del mundo (Bahr, Mertins, 1985).

Los volúmenes de población que explican el crecimiento de Santiago respecto al resto del país, se deben a la atracción ejercida por el modelo de desarrollo característico de la década del sesenta, de industrialización por sustitución de las importaciones, proceso localizado mayoritariamente en la Región Metropolitana. De esta manera, las decisiones políticas nacionales han influido claramente sobre la localización de las fuentes de contaminación atmosférica, al determinar tipos de industria y formas de transporte de bienes y de personas (Gwyne, 1985). Durante la última década la tendencia a la concentración industrial ha cambiado para dispersarse en las regiones y ser sustituida por la localización centralizada en Santiago de las actividades de finanza, comunicación y servicios que demandan y producen, a su vez, elevación de la calidad de vida, de los ingresos y de los patrones de movilidad espacial.

Consecuentemente, las evidencias de colapso ambiental periódicamente observadas en Santiago, constituyen un desafío complejo para la planificación del desarrollo urbano, que, de ser considerado, acarrearía difíciles decisiones sobre su crecimiento, densidades y usos del suelo. En el caso específico de la contaminación atmosférica, de controlarse los actuales niveles (partículas), por medio de estrategias y diseños "ambientales" del espacio urbano existente, las evidencias indican que serán reemplazados por nuevas contaminaciones de tipo físico-químico, menos visibles, pero más peligrosas para la salud, los suelos, el agua y la vegetación y cuya solución pasa por medidas de tipo tecnológico. Por otra parte, en la medida que las soluciones a la problemática específica de la contaminación del aire por partículas concurren igualmente al necesario mejoramiento global de la "calidad de vida" y al desarrollo metropolitano, su aplicación debe ser integrada a las medidas de planificación urbana en curso.





## CONSECUENCIAS DE LA LOCALIZACION DE LA CIUDAD

La localización de la Intercomuna a los 32° 55' y los 34° 19' Lat. Sur y los 69° 46' y 71° 39' Long. Oeste, bajo el predominio anticiclonal subtropical, es una de las características atmosféricas explicativas de los altos niveles de contaminación fotoquímica y por aerosoles, situación que diferencia claramente a Santiago de otras metrópolis latinoamericanas.

El territorio geográfico de la región, de 15.479 km<sup>2</sup>, está formado en un 85,7% por montañas y la urbanización ocupa sólo el 3,3% del valle. Las tres grandes unidades de relieve de la zona son las cadenas de la Cordillera de Los Andes y de la Costa, con alturas máximas de 6.570 m y 2.222 m, respectivamente, y la depresión intermedia. El desarrollo urbano de Santiago se ha efectuado sobre la depresión intermedia, situada aproximadamente entre los 500 y los 2.500 metros sobre el nivel del mar.

Las capas de inversión térmica de altura incrementan la estratificación y estabilidad atmosférica e interceptan las laderas de los sistemas montañosos andino y costero de la secuencia de cuencas hidrográficas características de Chile central, entre las que se encuentra la Cuenca de Santiago. Figuras 3.1 - 3.2 (ver página 75)

La localización de Santiago y de otras ciudades de Chile central, ocurre bajo condiciones atmosféricas de extraordinaria estabilidad y potencialmente muy vulnerables a la contaminación atmosférica. A lo anterior se suman los efectos de los flujos locales y regionales de masas de aire, capaces de transportar polvo, partículas en suspensión y gases entre ciudades, entre cuencas y entre sectores superiores e inferiores de los valles. Ahora bien, no siendo posible controlar o manejar las condiciones climáticas existentes, hay que insistir en la "modelación" del clima urbano por medio de la configuración del paisaje urbano en términos de volumetría y de áreas verdes.

La atmósfera de Santiago puede saturarse de contaminantes con niveles medios de emisión tal vez inferiores a los actuales, alternativa que conduce a sugerir, por ejemplo, localizaciones industriales y expansiones urbanas más allá de los límites de la cuenca y a prevenir desde ya la posibilidad de repetición de similar escenario en otras ciudades de la zona central.

El reconocimiento de estos antecedentes debería condicionar, a futuro, algunas decisiones claves de planificación urbana, especialmente cuando las opciones de una estructura urbana ambientalmente sustentable promueve una mejor calidad de vida.



## CRECIMIENTO EN EXPANSION

De los 15.549,40 km<sup>2</sup> de superficie de la Región Metropolitana, el 84,5 % de los suelos presenta una limitada y escasa aptitud agrícola. Sin embargo, la acelerada expansión de la superficie urbanizada se ha realizado preferentemente sobre los suelos de más alta calidad agrícola, I y II de riego, los mejores y más escasos del país. Estas pérdidas son lo suficientemente elevadas: 1.294,3 ha/año en promedio, como para reflexionar sobre sus consecuencias: ocupación de suelos favorables a la agricultura, aumento de calles, a menudo sin pavimentar, de los tiempos de viaje y, por ende, de los medios de transporte, mayor distancia entre centros de equipamiento, servicio y trabajo, menor provisión de áreas verdes, etc.

Esta situación de acelerada expansión hacia la periferia corresponde, aproximadamente, a las previsiones iniciales del Plan Intercomunal de Santiago de 1960, cuya imagen final, al año 2000, comprendía una ciudad de 5.000.000 de habitantes y superficie casi comparable a la actualmente consolidada. El Plan Intercomunal de Santiago fija, en 1960, las directrices de crecimiento de la ciudad hasta el año 2.000, considerando: un gran centro de comercio y servicios rodeado de subcentros localizados en las principales intersecciones viales; zonas de industria conformando un eje Norte Sur en el borde Poniente; sistema de áreas verdes organizado en torno a Parques Intercomunales; ejes comerciales y zonas de vivienda y un completo sistema vial jerarquizado que incluía la Circunvalación A. Vespucio y el paso de la carretera Norte-Sur. Y aunque la metrópolis así definida es una de las menores de Latinoamérica, dado el contexto climático, se ha constituido en una opción de planificación desfavorable al control de la contaminación atmosférica. Figura 3.3 (ver páginas 76-77)

Por lo mismo, la revisión en curso del Plan Intercomunal de Santiago que define límites precisos de expansión urbana (SEREMI MINVU, 1993), muy coincidentes con los del Plan Intercomunal de 1960, y que plantea un crecimiento basado en el aumento de la densidad, no logra constituirse en una estrategia capaz de controlar la contaminación. La integración de las consideraciones ambientales podría, en cambio, transformarlo en herramienta eficaz en esta tarea.

En términos cuantitativos, las mayores pérdidas de suelos de alta calidad se registraron en los períodos 1960-1970 y en 1980 - 1985. Esto ha significado que, en los últimos 10 años, la superficie total de riego ha disminuido en un 60,7%. Las direcciones del avance de la urbanización, según las definiciones del Plan Intercomunal y la presión de la demanda, ha sido el siguiente:



Tabla N° 3.1: Avance de la urbanización en Santiago, por sectores.

Sector	Total avance ha.	% total	Ir %	IIr %	IIIr %	IVr %	Secano
Norte	1.769	6,64	58,8	36,6	4,6	5,1	0
Noroeste	1.266	4,75	84,8	6,6	1,1	5,1	2,4
Este	4.148	15,58	31,7	39,8	12,0	7,1	9,4
Sureste	3.590	13,48	50,0	29,0	1,0	0	20
Sur	6.571	24,68	0	53,5	46,5	0	0
Sur oeste	2.525	9,48	6,3	42,4	37,2	13,4	0,7
Oeste	3.266	12,26	42,0	28,8	12,2	7,8	9,2
Total	26.629	100	27,0	36,6	26,6	4,1	5,5

La expresión cuantitativa de este avance sobre los suelos de I y II de riego y sobre los de secano durante el período 1955 - 1985 fue la siguiente:

Tabla N° 3.2: Expresión cuantitativa del avance de la ciudad sobre los suelos de riego y de secano en el período 1955-1985.

Período	Total avance urbano ha	Avance sobre secano ha	%	Avance sobre Ir y IIr ha	%
1955-1960	2.781	0	0	2.781	100,0
1960-1970	9.882	22	0,2	9.860	99,8
1970-1975	7.382	907	12,3	6.475	87,7
1975-1980	6.582	528	8,0	6.061	92,0
1980-1985	13.721	68	0,5	13.653	99,5
Total	40.355	1.525	3,8	38.830	96,2

La expansión periférica se ha realizado principalmente en las zonas sur y suroeste, área preferencial de construcción de grandes conjuntos de vivienda social por el menor valor del suelo y definiciones del Plan Intercomunal lo que, dado el comportamiento de los vientos en la Cuenca, favorece el traslado de la contaminación generada en estas nuevas áreas hacia el centro y área oriente de la ciudad. Cabe observar, por lo demás, que el movimiento de las masas de aire es desde la totalidad de la periferia hacia el centro, lo que elimina cualquier planteamien-

to de algún borde desde el cual no exista acarreo de contaminación hacia el centro de la ciudad. *Figura 3.4 (ver página 78)*

Analizar la expansión física de Santiago (ver Tabla N°3.3) significa considerar, no sólo la superficie incorporada al uso urbano, sino también la modalidad de esta expansión (direcciones, patrones densitarios), y no únicamente respecto al medio natural, sino también en relación a sus efectos sobre el suelo urbano, siendo este último el "recurso básico" social y culturalmente producido, en el caso chileno, a través de las medidas de planificación urbana.

Tabla N° 3.3: Expansión física de Santiago en el período 1900-1985 y su proyección a 1995.

Año	ha (1)	ha (2)
1900	4.000	
1940	10.985	
1952	15.047	
1960	20.985	
1970	30.241	
1982	38.296	46.000
1985	40.930	58.000
Proyección:		
1995	57.112	

(1) Proyección INE, SEREMI MINVU.

(2) Salinas A.M. Expansión urbana y compromiso ambiental de Santiago.

En una perspectiva de conservación de los recursos básicos, para lograr la sustentabilidad, se ha indicado que el "suelo es el recurso básico malgastado en las ciudades"...por las bajas densidades, los eriazos, los estacionamientos en sitios no construidos...[El Consejo de Europa y su Comisión del Medio Ambiente Urbano, insisten en la necesidad de usar mejor el suelo ya urbanizado, evitando crear nuevas zonas en las periferias (Elkin, 1991).]

En el caso de Santiago, la modalidad de crecimiento físico ha estado estrechamente vinculada a las decisiones del Plan Intercomunal de Santiago y de las políticas y programas de vivienda social, las que han llegado a imponerse sobre el primero. Durante los cuatro últimos decenios, las decisiones de ambos instrumentos de planificación urbana han condicionado localizaciones periféricas y prome-

dios de densidades de edificación muy bajos: 95 a 110 hab/ha. (SEREMI MINVU, 1993). Más recientemente, la obligación de presentar factibilidad de agua potable ha empezado a establecer un límite urbano de facto. Las tasas promedios anuales muestran que el período de más rápido crecimiento de Santiago se registró en 1980-1985 (5,5%), coincidiendo con el momento de creación del Área de Expansión Urbana.



## MODALIDAD DE CRECIMIENTO

Inicialmente, durante la primera mitad del siglo, la modalidad de expansión ha estado parcialmente condicionada por la existencia de umbrales o barreras físicas al crecimiento: calidad de los suelos agrícolas, ferrocarril de circunvalación en un momento, así como por la dirección e importancia de las vías de acceso a la ciudad. Documentos históricos señalan que, desde el inicio de la vida de la ciudad, se constata la existencia de una intensa contaminación del aire por polvo en suspensión.

Entre 1900 y 1940, la superficie urbana aumenta en un 2,2%, similar al aumento demográfico, con una clara tendencia de ocupación del borde este. En 1940, el límite sur de la ciudad llega a la altura del Parque O'Higgins y al Estadio Nacional, más una cuña en torno a la Panamericana Sur. El oriente no alcanza a Av. Tobalaba, el norte sigue el borde del Cerro San Cristóbal y se extiende de forma poco compacta y como conjuntos habitacionales populares hasta el Hipódromo, en tanto que por el norponiente se ha sobrepasado el Parque Forestal. La ciudad se extendía 12,5 km en el sentido norte-sur y en una dimensión similar en el sentido este-oeste.

A partir de ese momento, el crecimiento de Santiago está íntimamente vinculado a sucesivas políticas y planes de vivienda social, implementadas sostenidamente desde la década de los '50. La ciudad se mantiene relativamente pequeña y compacta hasta inicios de los años '60, extendiéndose unos 27 Km en el sentido norte-sur. La estructura del uso del suelo comprende un centro de comercio y de servicios rodeado de barrios residenciales de relativa heterogeneidad económica, social y funcional. El lento crecimiento toma forma de cuñas y afecta especialmente al sector oriente. Se trata de un crecimiento por conjuntos residenciales de tamaño relativamente modesto, en comparación a los que vendrían posteriormente, pero su importancia reside en la fijación de una tendencia de implantación en la periferia. La ciudad sigue creciendo en forma menos compacta durante los años '60. Las prolongaciones hacia el sur esta vez dejan intersticios que no son ni claramente urbanos ni totalmente rurales. El desarrollo de los sectores sur y suroriental empieza a ser significativo durante la década de los setenta, adquiriendo desde entonces una intensidad coincidente con la modificación del Plan Intercomunal de 1979, que crea el Área de Expansión Urbana y afecta diferentemente a las comunas de la capital.

La superficie total incorporada en la década 1960-1970, alcanza a 9.610 ha, y entre 1970-1980, a 12.787. En otros términos, el promedio pasa de 961 ha/año a 1.066 ha/año, respectivamente. Tales promedios fueron sobrepasados significativamente en el período 1980-1985, cuando llega a 2.744 ha. anuales (superficie total incorporada de 13.721 ha).

El crecimiento responde al brusco aumento de la población de la ciudad, provocado por fuertes migraciones y por el crecimiento vegetativo de esa nueva población. Inicialmente, este crecimiento poblacional se realiza por densificación de las áreas centrales, consolidadas a través de soluciones habitacionales como los cités y conventillos y, sólo posteriormente y por las acciones habitacionales del Estado, se orienta hacia la periferia.

Actualmente, la modalidad de crecimiento hacia la periferia se encuentra acentuada ante la total ocupación del territorio de las comunas más antiguas en posición mediterránea, tales como Santiago, Providencia, Independencia, Quinta Normal, San Miguel. *Figura 3.5 (ver página 80)*

La aceleración de esta modalidad de crecimiento ha afectado la rapidez de ocupación de cada territorio comunal y ha definido las pautas de expansión disponibles en el interior del nuevo límite urbano (Plan Intercomunal de Santiago, 1993). La Comuna de Santiago era la única que se encontraba completamente urbanizada en 1960, pero, en 1985, otras 17 estaban totalmente urbanizadas y el resto lo estaba entre un 0.56 (Lo Barnechea) y un 90% (Cerrillos, Recoleta, Cerro Navia).

Hasta 1960, Santiago tiene un crecimiento vegetativo del 22.5% (con una tasa bruta de natalidad del 32.9%). En 1981, el crecimiento vegetativo fue de un 17.3%. Este crecimiento vegetativo explica el 60% del crecimiento en el período 1952-1960 y del 80.5% entre 1970 y 1982. El incremento y evolución de la población de Santiago se explica y está vinculado a la forma de desarrollo del país, al rol que Santiago ha ocupado en cada etapa y a las ventajas comparativas favorables a la concentración y localización industrial que sustentaron la reciente etapa de crecimiento económico, ventajas explícitamente reforzadas por la creación de infraestructura y de sistemas de transportes centralizados en la capital, proceso que recién empieza a ser revertido por un nuevo contexto económico y por la descentralización de facto de las nuevas industrias de exportación (Seminario Fundación Libertas, ¿Quo Vadis Santiago?, 1992).

A pesar de la fuerza descentralizadora en curso, Santiago mantiene la mayor concentración de empleo industrial del país y todo indica que su rol como metrópolis especializada en servicios financieros se acentuará fuertemente, con la consiguiente concentración de un elevado poder adquisitivo, lo que significa un mayor número de automóviles (Fuensalida, Seminario Fundación Libertas, 1992). La distribución de la dinámica poblacional de los diez últimos años muestra, sin embargo, que las áreas centrales mejor equipadas pero más deterioradas *Figura 3.6 (ver página 79)*, pierden habitantes en tanto que la periferia sur se constituye como zona de rápido crecimiento poblacional. *Figura 3.7 (ver página 80)*



Tabla N° 3.4: Porcentaje de Urbanización del territorio comunal 1960-1985.

Comunas	Sup. tot. ha	Sup. Urb. % 1960	Sup. Urb. % 1970	Sup. Urb. % 1980	Sup. Urb. % 1985
Santiago	2.230	100	100	100	100
Independencia	740	93,54	100	100	100
E. Central	1.380	74,93	87,24	98,84	100
Conchalí	1.060	18,58	78,87	96,98	100
Q. Normal	1.230	92,27	97,40	100	100
Lo Prado	660	17,57	68,48	100	100
La Cisterna	1.000	88,00	100	100	100
Lo Espejo	710	75,21	75,21	100	100
El Bosque	1.390	42,87	66,18	100	100
La Granja	1.000	0,6	69,6	93,60	100
San Ramón	660	13,03	66,06	92,73	100
San Miguel	950	93,26	100	100	100
P.A.Cerda	980	78,77	95,10	100	100
San Joaquín	990	81,21	100	100	100
Nuñoa	1.630	76,13	100	100	100
Macul	1.230	37,15	97,39	100	100
Providencia	1.420	99,01	99,01	100	100
Cerrillos	2.080	24,23	45,48	63,12	99,56
Recoleta	1.500	74,93	80,26	93,33	93,33
C.Navia	1.100	11,36	41,18	82,63	92,82
La Pintana	3.000	1,93	8,86	45,33	73,56
Vitacura	2.860	7,97	46,01	67,13	69,93
La Reina	2.330	17,85	25,75	60,43	60,43
Renca	2.280	57,01	21,93	40,08	45,44
Quilicura	5.660	0,30	1,13	8,51	45,39
P.Alto	8.780	4,70	0,24	24,55	43,51
Maipú	13.120	2,78	4,64	15,48	41,55
S.Bernardo	9.880	5,31	9,07	20,66	35,04
La Florida	7.020	3,54	7,68	25,44	33,12
Huechuraba	4.430	0,36	5,05	8,85	31,55
Las Condes	9.850	11,00	24,75	29,99	30,19
Peñalolén	5.490	0,18	8,92	23,71	28,67
Pudahuel	19.620	4,00	5,63	7,71	12,97
Barnechea	102.950	-	-	0,38	0,56

También esta modalidad de crecimiento, acentuado por las orientaciones de la Política Nacional de Desarrollo Urbano de 1979, aplicada en la Intercomuna por medio de la Ordenanza del Plan Intercomunal aprobada con el D.S. 420 de 1979, ha contribuido a reforzar anteriores tendencias a la segregación socio económica y la realidad actual de Santiago ha podido sintetizarse como la vecindad de "dos ciudades"; la moderna y desarrollada y la retrasada, donde se acumulan pobreza, desempleo, elevados índices de mortalidad infantil y, además, importantes porcentajes de calles sin pavimentar (La Pintana con un 60,4% de calles sin pavimentar, San Bernardo con el 57,6%, Puente Alto 52,8%, Renca 43,1%, Cerro Navia 32,3%, San Ramón 25,9%, según CEDRM. Ver Figura 3.8 (ver página 81), y déficits de áreas verdes públicas Figuras 3.9 y 3.10 (ver páginas 81-82), equipamiento y servicios.

Esto significa la existencia de dos contextos con diferentes vulnerabilidades y potencialidades de generación de contaminación atmosférica por partículas y polvo en suspensión, así como la concentración territorial de grupos etarios y sociales con menores defensas frente a episodios de emergencia.



## DISTRIBUCION DE LOS USOS DEL SUELO

En tal contexto, las definiciones de la estructura de usos del suelo determina intensidad y tipo de contaminaciones de acuerdo a las localizaciones preferenciales de la industria, el comercio y la vivienda en especial.

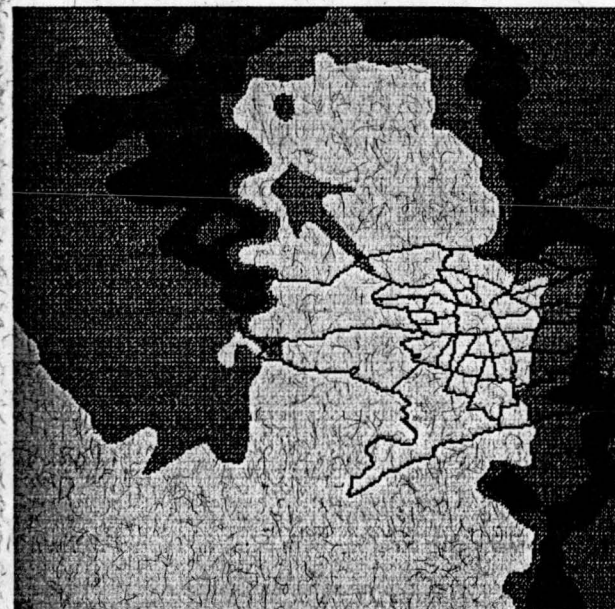
La estructura urbana inicial de la ciudad, conformada por un centro de comercio y servicios, rodeado de áreas residenciales relativamente segregadas, se modifica profundamente durante este siglo, especialmente a partir de la década de los '60, momento a partir del cual el Plan Intercomunal de Santiago se constituye en el principal instrumento que "regula" los usos del suelo por la vía negativa. Efectivamente, los instrumentos chilenos de planificación urbana actúan prohibiendo localizaciones, sin incentivar ni crear implantaciones. Esta orientación negativa se explica, entre otras cosas, por la desvinculación entre instrumentos de planificación urbana y medidas e instrumentos económicos (Bertrand DPU, Londres), tarea que cumple con cierto éxito salvo en el caso de la localización de un porcentaje importante de industrias. Las localizaciones industriales previstas por el Plan Intercomunal se han cumplido, pero, paralelamente, existe una localización diferente y, en este sentido, "ilegal", especialmente por parte de pequeñas y medianas industrias.

Recientes estudios permiten constatar la falta de desarrollo de un auténtico esquema "metropolitano" de las actividades (Bertrand, 1984) y la acentuación de la polarización entre comunas con usos del suelo diversificados y alto nivel de equipamiento, versus aquellas monofuncionales y carentes de equipamiento básico. Se trata de patrones que pesan en el grado de concentración o de dispersión del empleo y en la intensidad y sentido de los flujos vehiculares, además de las posibilidades de desarrollo y eventualidad de concentración de contaminaciones.

En 1981, un estudio (EMOS, 1981), evidenció el escaso desarrollo metropolitano de Santiago. La distribución de los porcentajes globales por uso del suelo correspondían a una estructura de ciudad de tamaño medio. El uso del suelo "vivienda" ocupaba el 51% del territorio urbanizado, en tanto que los "servicios/industria" presentaban un escaso 1%, las "áreas verdes" un 5 %, al igual que "comercio/servicios" y la industria llegaban a un 6%.

Cinco años más tarde, otro informe técnico Catastro Industrial de la Región Metropolitana, 1985), determinó las "tendencias a la especialización" de cada comuna, según las mismas grandes agrupaciones de los usos del suelo: vivienda, industria, comercio y áreas verdes. El análisis mostró una distribución relativamente concentrada de usos en grupos específicos de comunas:

- **Vivienda.** Las comunas más "residenciales", menos especializadas, son La Pintana, Lo Barnechea, Peñalolén, en tanto que en el otro extremo se ubican Santiago, Recoleta, Macul, Estación Central.
- **Comercio.** Concentrado en el centro y pericentro, especialmente en las comunas de Santiago, Recoleta, San Miguel, Ñuñoa, Macul, en tanto se presentan como deficitarias Puente Alto, Quilicura, Lo Barnechea, Peñalolén.
- **Industria.** El 65% del empleo industrial está localizado en 8 comunas, lo que señala un alto grado de especialización de la actividad. Estas comunas son: San Joaquín, Santiago, Quinta Normal, San Miguel, Ñuñoa, Macul, Estación Central y San Bernardo *Figura 3.11 (ver página 82).*
- **Áreas verdes.** Los mejores índices de áreas verdes públicas se encuentran en Santiago, Providencia, Vitacura, Las Condes, La Reina. El análisis en términos de m<sup>2</sup> de áreas verdes habilitadas/ habitante/ comuna, mostraba que catorce comunas tenían una dotación de menos de 1m<sup>2</sup>, y sólo cuatro más de 4 m<sup>2</sup> habilitados/ habitante. Este déficit podría ser superado por las actuales iniciativas del MINVU y CONAF Región Metropolitana. Sin embargo, el rol paliativo de las áreas verdes debe ser claramente reconocido. El uso del "material vegetal" en el control de la contaminación requiere de decisiones cualitativas complejas estrechamente vinculadas a los cauces hidrográficos y a diseños de "conducción" y "uso" de los vientos derivados de las observaciones de la topoclimatología.



#### CUENCA DE SANTIAGO

Figura N°3.1: La Intercomuna en la cuenca de Santiago.



#### CUENCA DE SANTIAGO

Figura N° 3.2: Se trata de una cuenca hidrográfica encerrada por cordones de cerros y por contrafuertes cordilleranos, conformada por sistemas torrenciales cuyo dinamismo se explica por las estrechas interrelaciones entre la topografía, las dimensiones de la cuenca, el estado de la cobertura vegetal y el régimen climático.



SANTIAGO

Area Urbana

Escala aproximada 1: 450.000

SÃO PAULO

Area Urbana

Metro .....

Ferrocarril ———

Vialidad ———

Escala aproximada 1: 450.000

BUENOS AIRES

Area Urbana

Metro .....

Ferrocarril ———

Vialidad ———

Escala aproximada 1: 450.000

CIUDAD DE MEXICO

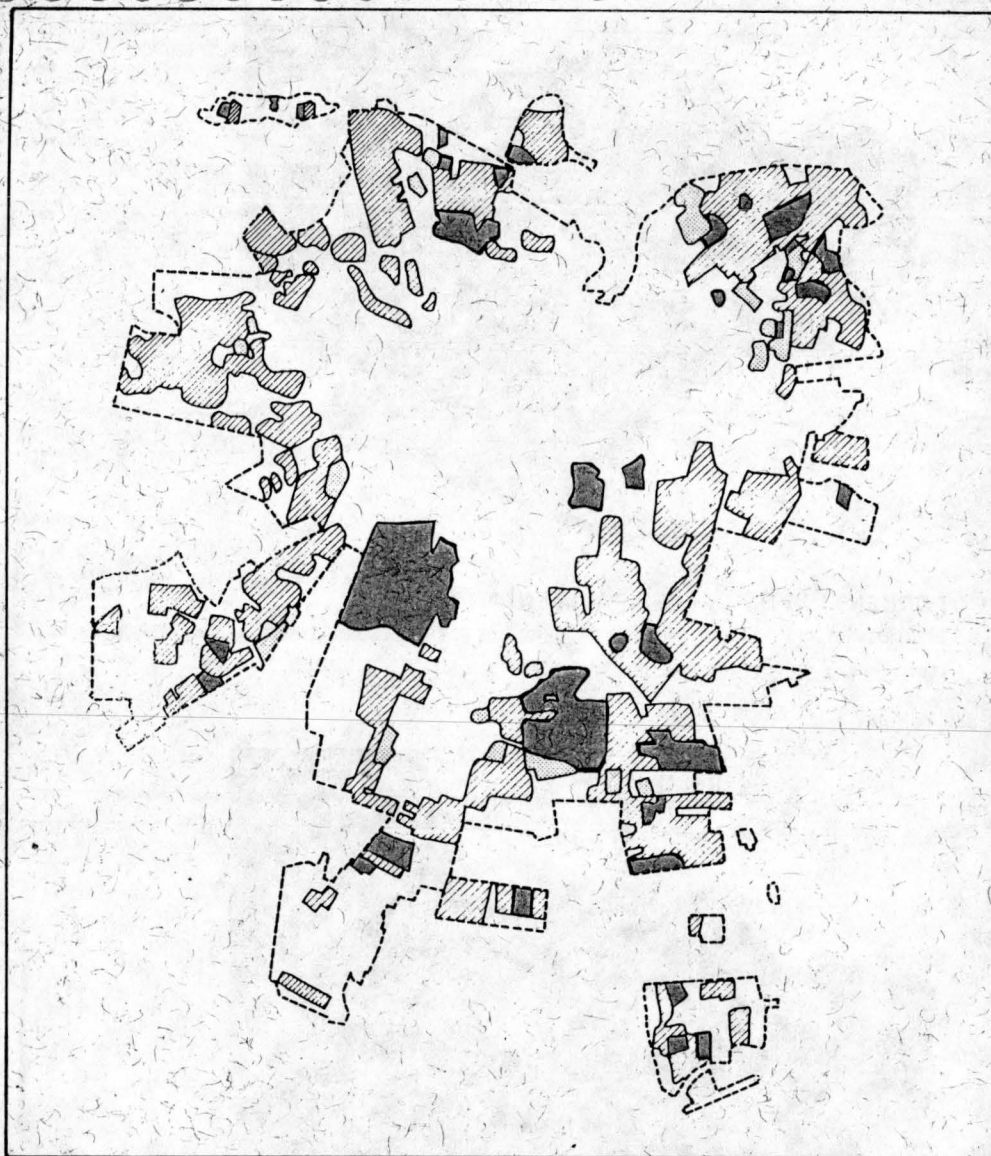
Area Urbana

Metro .....

Vialidad ———

Escala aproximada 1: 450.000

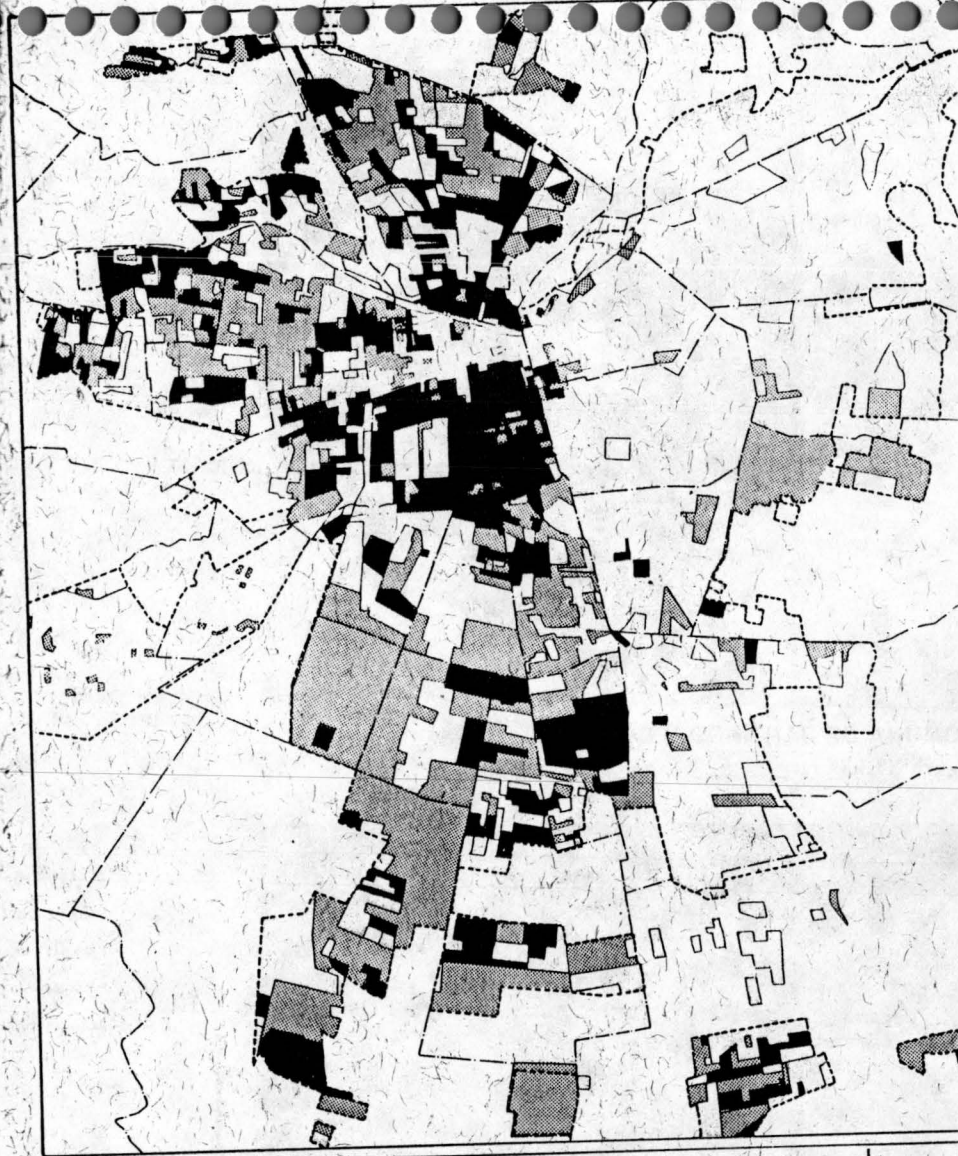
Figura N° 3.3: Tamaños comparativos de las áreas urbanas consolidadas de Santiago, Buenos Aires, Sao Paulo,



SIMBOLOGÍA		AVANCE URBANO DE SANTIAGO 1956-1976	
	1956 - 1960	2.644 Hds	 INVESTIGADOR : MARIA BERTRAND FUENTE:  DIBUJO : ALLAN OÑE C. FECHA : JULIO 1991
	1961 - 1965	399 Hds	
	1966 - 1970	9.271 Hds	
	Límite Urbano D.S. 420 1976	6.251 Hds	
TOTAL		18.565 Hds	

#### AVANCE URBANO DE SANTIAGO 1956-1976

Figura N° 3.4: Direcciones y tamaños de la expansión urbana entre 1956 y 1976, con anterioridad a la creación del Área de Expansión Urbana de la Intercomuna de Santiago (por medio del D.S. 420), consecuencia de la Política Nacional de Desarrollo Urbano de 1979.

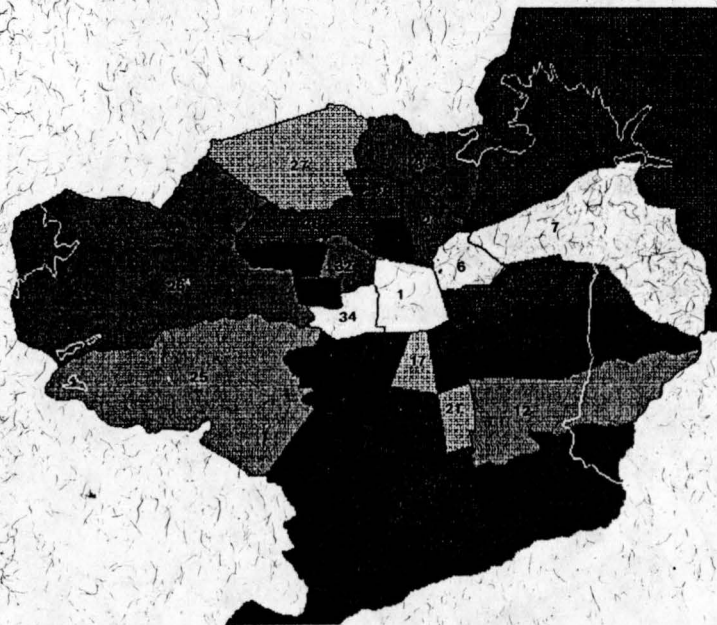


SIMBOLOGÍA		ESTADO DE LA EDIFICACION EN EL GRAN SANTIAGO - 1986	
	EDIFICACION EN BUEN ESTADO	FUENTE : SEREM - Vivienda y Urbanismo R. Metropolitana  Dibujo: Allan Oñe C. Fecha: Diciembre - 1990	
	EDIFICACION EN ESTADO REGULAR		
	EDIFICACION DETERIORADA		

#### ESTADO DE LA EDIFICACION EN EL GRAN SANTIAGO 1986

Figura N° 3.6: Importancia del deterioro constructivo en las áreas interiores, las más antiguas por equipadas. La necesidad de una vigorosa política de renovación urbana y "crecimiento hacia el interior" de manifiesto con este solo antecedente.





COMUNA DE SANTIAGO Y COTA 1000 (MTS.)

Figura N° 3.5.



DINAMICA POBLACIONAL 1982-1992

- ALTA PERDIDA
- BAJA PERDIDA
- CASI SIN VAR
- BAJA GANANCI
- ALTA GANANCI



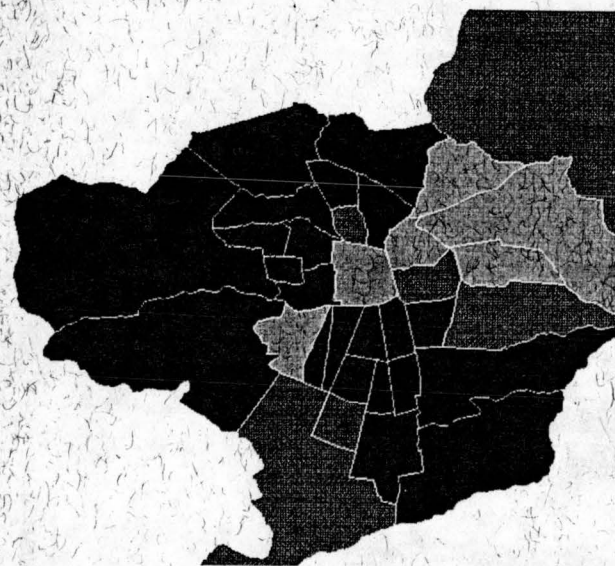
PORCENTAJE DE CALLES PAVIMENTADAS

Figura N° 3.8: La mayor cantidad de calles sin pavimentar se encuentra, nuevamente, en la p... especialmente en el borde sur.



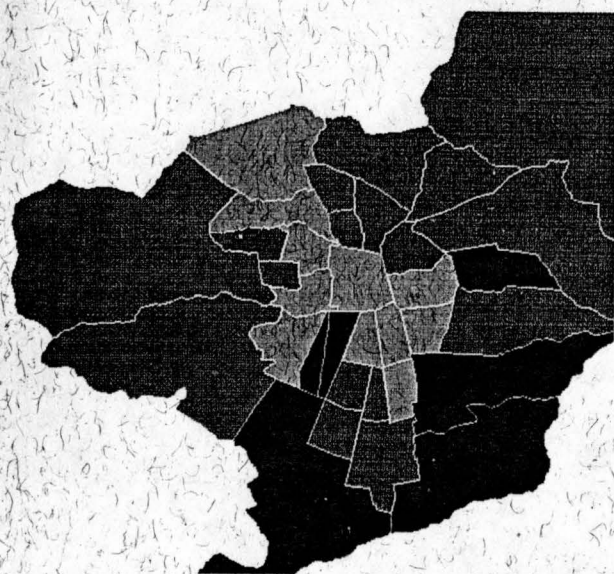
DOTACION DISPONIBLE DE AREAS VERDES POR COMUNAS

Figura N° 3.9: La periferia sur desde la cual convergen las masas de aire ofrece las menores dotaci...



### CATEGORIAS DE AREA VERDE POR HABITANTE

Figura N° 3.10: Las áreas verdes públicas existentes presentan serias deficiencias cualitativas en casi la totalidad del territorio comunal.



### INTENSIDAD DEL USO INDUSTRIAL POR COMUNAS

Figura N° 3.11: La localización industrial ocupa casi la totalidad de la periferia de la Intercomuna, con excepción del sector oriente y algunas comunas mediterráneas. La importancia de la localización central y periférica y de otro factor de difícil resolución para una planificación urbana sustentable.



## CONCLUSIONES

La Intercomuna presenta diferenciaciones de usos del suelo propias de una progresiva especialización funcional. Asociadas éstas a claras tendencias de aumento del suelo urbanizado con disminución de los promedios estadísticos de densidad residencial, significativo aumento de las fuentes móviles, se han potenciado los efectos “naturalmente” negativos del contexto climático, acentuando el tipo de contaminación atmosférica actualmente predominante en Santiago. El desarrollo económico, tecnológico y la diversificación de usos del suelo que eliminen o reduzcan significativamente las actuales fuentes de emisión de partículas y polvo en suspensión, tampoco constituirán y sólo sustituirán una contaminación visible por otra menos visible pero más peligrosa para los seres vivos, salvo adopción decidida de desarrollo económico y urbano sustentables.

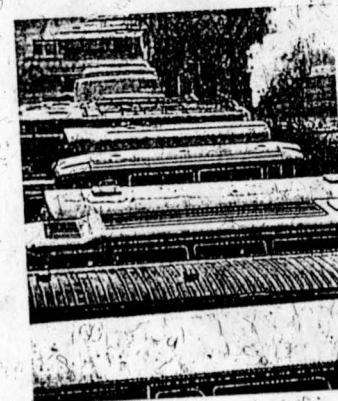
El auténtico mejoramiento de la “calidad de vida” urbana en el área metropolitana de Santiago, requiere, indiscutiblemente, de la integración de la planificación y gestión ambientalmente sustentables del suelo urbano. Integración urgente, entre otras causas, porque medidas administrativas como el control de las emisiones constituyen paliativos que no llegan a tocar uno de los principales factores de contaminación: el manejo sustentable del “recurso básico” suelo, de sus usos y modos de uso por parte de la población.

La presencia, inevitable, de la inversión térmica podría, sin embargo, plantear umbrales más severos para el futuro de Santiago, al fijar una aguda contradicción entre crecimiento económico, mejoramiento de los niveles de ingreso y demanda de una mejor calidad del aire como parte de la calidad de vida adecuada a tal elevación del poder adquisitivo. Contradicción que no lograría ser resuelta ni fijando límites precisos a la expansión del suelo urbano, contenido o no por anillos verdes perimetrales, ni elevando las densidades y usando intensivamente el suelo disponible salvo, tal vez, adopción de diseños clara y sistemáticamente orientados a “ventilar” el espacio urbano. Aún así, es posible que el contexto climático fije umbrales a los niveles de desarrollo o a la cantidad de habitantes de un área que busque mantener una cierta calidad de vida. De ser así, la alternativa es grave y requiere del inicio de análisis especializados interdisciplinarios que definan los escenarios posibles y las medidas necesarias para lograr la calidad de vida deseable para el futuro inmediato de la Intercomuna de Santiago.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Catastro Industrial de la Región Metropolitana, A.C. Consultores. Segunda Etapa. Diagnóstico y Proposiciones. Solicitado en 1985 por la Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- CED, Santiago dos ciudades, 1990, 235 pp. Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana. Programa 1992.
- C. Fuensalida. Ponencia en el Seminario de la Fundación Libertas.
- E. Dockendorff, C. Fuensalida C., M Bertrand S. et al. Santiago, dos ciudades. CED, Santiago, 1990.
- EMOS. Plan Maestro de Alcantarillado. 1981.
- ESTRAUS. Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano en la ciudad de Santiago, 1990.
- Gwyne R.N. Industrialization and Urbanization in Latin America. London and Sidney, Croom Holm, 1985.
- J. Bahr, G. Mertins. Desarrollo poblacional en el Gran Santiago entre 1970 y 1982. Revista Geográfica Norte Grande, 12, 1985, pp 11-26.
- M. Bertrand S, R. Figueroa M. et al. Riesgos Geofísicos y Normativa Urbana. El caso del piedemonte de Santiago entre los ríos Mapocho y Maipo. FONDECYT. 1003-91, marzo 1993, 254 pp.
- M. Bertrand S. A Search of Order: Land Use Planning in Metropolitan Santiago. Development Planning Unit (DPU), London.
- M. Bertrand S. El proceso de metropolización de Santiago. Conferencia Encuentro sobre Metrópolis, F.A.U., 1984.
- Memoria Plan Intercomunal de Santiago, en revisión. Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1993.
- Ministère de l'Environnement. Etat de l'Environnement 1991-1992, Paris, La Documentation Française, 1993, 308 pp.
- Plan Intercomunal de Santiago, Secretaría Regional Ministerial del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 1993.
- S. Boyden, S. Miller, K. Newcombe, B. O'Neill. The Ecology of a City and its People. The Case of Hong Kong. Camberra, Australian National University Press, 1981, 437 pp.
- Seminario Fundación Libertas. ¿Quo Vadis Santiago?. Noviembre 1992.
- T. Elkin, O. McLaren, M. Hillman, Reviving the City. Towards Sustainable Urban Development. London, Friends of the Earth, 1991.
- The Local Government Management Board, "Comprehensive Transport Strategies. Greater Hull/Leeds/Leicestershire", *Environmental Practice in Local Government*, Second Edition, 1992.



## CAPITULO 4 EMISIONES DE CONTAMINANTES A LA ATMOSFERA Hugo Sandoval L.

<i>Emisiones de contaminantes a la atmósfera</i>	87
<i>Características de los procesos emisores</i>	88
<i>Estimación de emisión de contaminantes</i>	92
<i>Obtención de inventario de emisiones</i>	93
<i>Emisiones al aire de Santiago</i>	93
<i>Conclusiones</i>	106
<i>Referencias Bibliográficas</i>	107

■ **Hugo Sandoval Leiva**

*Licenciado en Química.*

*Químico. Pontificia Universidad Católica de Chile.*

*Especialización en Contaminación Atmosférica en el Statewide*

*Air Pollution Research Center, University of California, Riverside.*

*Director Ejecutivo del Programa de Investigación en Contaminación Ambiental (PRICA), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, desde 1991.*

*Participación como investigador principal y como jefe de proyecto en varios de los estudios más importantes sobre contaminación atmosférica, desarrollados en Santiago a partir de 1978, relacionados con inventarios de emisiones, caracterizaciones de emisiones y contaminantes, modelos de dispersión, derechos de emisión y monitoreo de contaminantes en faenas mineras, entre otros.*

*Profesor Asociado, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Consultor del BID, PNUD y de otras Instituciones.*



## EMISIONES DE CONTAMINANTES A LA ATMÓSFERA

La incorporación directa de contaminantes gaseosos y particulados a la atmósfera es por dos vías, que indican el origen de estas sustancias. La primera de ellas corresponde a las fuentes emisoras de origen natural, dentro de las que destacan las descargas eléctricas que producen óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los océanos que aportan los aerosoles marinos y algunos vegetales que emiten hidrocarburos, entre otras. En cambio, la otra vía está representada por las fuentes de origen antrópico producto de las diferentes actividades que desarrolla el hombre. A este grupo pertenecen los procesos industriales y de combustión, el transporte vehicular y las pérdidas por evaporación, por nombrar algunas, que emiten gases y partículas según el proceso considerado.]

El aporte que hacen las fuentes emisoras naturales produce concentraciones de partículas y gases que definen los niveles de referencia o *background* de la atmósfera en general y de la correspondiente a zonas en particular, para diferentes contaminantes. Es así como dependiendo del sector al cual se dedique la atención, la concentración basal de partículas será diferente cuando ésta sea medida en el desierto o en un parque nacional, siendo muy superior la correspondiente al desierto. En algunas regiones, incluso, puede llegar a superar la norma media anual de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de aire.

[De acuerdo a los antecedentes planteados se infiere que es prácticamente imposible tener una atmósfera libre de contaminación o totalmente pura, a causa de la incidencia que tienen las fuentes de origen natural.]

[Una vez que los contaminantes han sido emitidos, experimentan una serie de fenómenos que determinarán el tiempo de residencia en la atmósfera para cada uno de ellos, el que varía entre 1 día y 7 años, como es el caso del ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y metano ( $\text{CH}_4$ ), respectivamente.]

• [Entre los procesos de remoción más importantes destacan la depositación seca



[y húmeda y las transformaciones físicas y químicas, que producen cambio de estado, como por ejemplo pasar de gas a partícula o la transformación de una sustancia en otra, como es el caso del  $\text{SO}_2$ , que da lugar a aerosoles sulfatos, por nombrar algunos.]

[Por otra parte, dependiendo de las características de la atmósfera, los contaminantes son transportados por el aire a grandes distancias, como sucede con el  $\text{SO}_2$ , e incluso a otros continentes, como es el caso de los freones (fluorocarbonos), que si bien son mayoritariamente utilizados en el hemisferio norte, han sido detectados en la zona antártica, igual que sus consecuencias.]

Los contaminantes producen variados efectos, una vez que sus concentraciones alcanzan ciertos niveles en la atmósfera. En primer lugar, están los efectos nocivos sobre los animales y vegetales, que se manifiestan reduciendo su desarrollo y productividad, en el caso de las cosechas. Como segundo punto, está el deterioro de materiales por corrosión, como sucede con el  $\text{SO}_2$  frente a algunos metales y, también, el ataque a estatuas o monumentos de mármol; la pérdida de coloración en tejidos, así como el deterioro de las pinturas; el craqueo o ruptura de polímeros en el caso de la goma, causado por el ozono. Adicionalmente, producen reducción de la visibilidad, que como fue estimada en el caso de Los Angeles, California, llegó a reducirse en un 50% por acción de los aerosoles sulfato.

[Puesto que las emisiones naturales y antrópicas no son constantes en el tiempo, a causa del ciclo natural, en las primeras, y producto del ciclo de operación del proceso emisor, para las segundas, sus efectos son distintos según el período en que se produzcan. Es así como en días de lluvia son lavados todos los contaminantes solubles en agua y las partículas de diferentes diámetros, pero en días secos, el impacto que ellas pueden tener está directamente asociado, por una parte, a la cantidad emitida por unidad de tiempo y, por otra, a la agresividad de las sustancias emitidas, sean gases o partículas. En el caso de éstas últimas, son de gran importancia su tamaño y composición química.]



## CARACTERISTICAS DE LOS PROCESOS EMISORES

### CLASIFICACION DE LAS FUENTES EMISORAS

[En general, las fuentes emisoras son clasificadas como fijas, móviles y no convencionales. Las primeras, son aquellas que emiten desde un lugar definido en el espacio, independientemente del tamaño que tengan; a pesar de que cuando éstas son de bajas emisiones se las considera agrupadas y se las incluye en la categoría de grupales, entre las que están las salamandras o estufas de uso residencial, en calefacción.

[Fuentes móviles son aquellas que emiten mientras están en movimiento y cambian constantemente de ubicación en el espacio. A este grupo pertenecen los

[medios de transporte terrestre, acuático y aéreo, impulsados por motores de combustión interna o eléctricos.]

[Las fuentes misceláneas corresponden a aquellas que aparecen en forma ocasional, como son los incendios de bosques y pastizales, los roces agrícolas, el polvo levantado desde el suelo y la detonación de explosivos, entre otras.]

### [ANALISIS DE PROCESOS EMISORES MAS RELEVANTES]

A continuación, se presenta un detalle de la forma en que son producidas las emisiones de contaminantes en los procesos más relevantes.

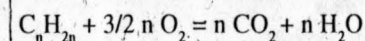
#### [Procesos de combustión]

[A este grupo pertenecen la combustión externa, con calderas y hornos; y la combustión interna, con automóviles y buses a gasolina o petróleo diesel.]

[La diferencia entre estos procesos, radica en que la combustión externa opera a presión atmosférica o próxima a ella y con volumen variable; en cambio, la interna lo hace a presiones del orden de 4 atm. y en un volumen definido por las dimensiones de la cámara de combustión y recorrido del pistón.]

[Estos procesos utilizan como materia prima, combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, además de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), proporcionados por el aire. El nitrógeno se considera como inerte, pero aún así, como se verá más adelante, experimentará reacciones. Ambos reactantes son mezclados, generalmente, según relación estequiométrica, de su ecuación química balanceada.]

[En una ecuación de combustión como la siguiente:]



Los coeficientes estequiométricos son:

1 para  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ;  $3/2 n$  para  $\text{O}_2$ ;  $n$  para  $\text{CO}_2$  y  $n$  en el caso del agua.

[ Los procesos de combustión producen contaminantes debido a las reacciones que se presentan a continuación: ]

[ **Formación de óxidos de nitrógeno  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2 = \text{NO}_x$**  ]



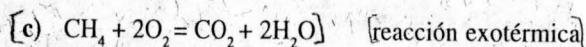
[El hecho de que la reacción "a" sea endotérmica (requiere calor), indica que el rendimiento para generar óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) aumenta en forma directamente proporcional con la temperatura; a mayor temperatura en la cámara de combustión, mayor será la producción de  $\text{NO}$ .]

[Para la reacción "b", que es exotérmica, sucede el proceso inverso, a mayor temperatura menor será el rendimiento del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), puesto que esta reacción libera calor cuando se produce.]

[Como la temperatura es aproximadamente el doble en los procesos de combustión interna ( $1500-2000^\circ\text{C}$ ) que en los de externa, esto implica que en los primeros hay una alta producción de  $\text{NO}$  y baja de  $\text{NO}_2$ ; en cambio, en los segundos el  $\text{NO}$  será alto, pero también experimentará un incremento la producción de  $\text{NO}_2$ .]

### [Producción de Monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e Hidrocarburos gaseosos ( $\text{HC}$ )]

[Este contaminante es producto de una combustión incompleta del combustible alimentado a la cámara, de manera que su mayor o menor concentración será función de la eficiencia o rendimiento de la reacción, puesto que para una reacción ideal se tiene, por ejemplo:]



[mientras más se aleje de la idealidad, mayor será la producción de  $\text{CO}$  y también de  $\text{HC}$ , por ser la reacción más incompleta o de un menor rendimiento.]

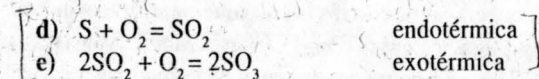
[El rendimiento o la eficiencia en un proceso de combustión depende de una serie de factores dentro de los que destacan:]

- La relación aire-combustible, que debe ser próxima a la estequiométrica, considerando un porcentaje de aire en exceso, que es variable según el estado físico del combustible. En el caso de gases es del orden del 25%, en cambio para combustibles sólidos como leña o carbón es de un 100%, según la forma de alimentación de combustible al equipo.
- Temperatura en la cámara de combustión, mientras más alta sea, mejor será el rendimiento, y viceversa.
- Otro factor que influye, corresponde al tiempo de residencia de la mezcla combustible en la cámara de combustión. A mayor tiempo, más eficiente será el proceso, siempre y cuando haya una alimentación adecuada a la relación estequiométrica.
- La eficiencia está directamente asociada al estado físico del combustible empleado. En el caso de los gases, alcanza el máximo valor, en cambio, para combustibles sólidos, será alta mientras más reducido sea el tamaño de sólido alimentado, es así como el carbón en grandes fuentes se usa pulverizado y la leña es convertida en chips, para lograr una mayor superficie de contacto entre éstos y el oxígeno.

### Generación de óxidos de azufre $\text{SO}_2$ y $\text{SO}_3 = \text{SO}_x$

[Depende única y exclusivamente del contenido de azufre en el combustible. A mayor contenido porcentual de azufre en éste, más alta será la cantidad de dióxido o trióxido de azufre a producir.]

[Las reacciones que dan origen a estas sustancias son:]



[Tal como en los casos anteriores, se observa que las reacciones tienen un efecto inverso con la temperatura. Mientras la "d" es favorecida con ella, en la "e" sucede lo contrario, disminuyendo la producción de  $\text{SO}_3$ .]

### [Producción de material particulado]

[Este tipo de contaminantes de variado tamaño y composición química es producido durante el desarrollo de una combustión incompleta o debido a procesos de síntesis que se generan durante su transcurso. De esta forma se producen, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Dependé fundamentalmente del tipo de combustible utilizado, es así, como para los gases la cantidad generada es muy reducida, pero se va incrementando con la menor volatilidad del combustible. Aquellas sustancias que son líquidas y presentan una baja presión de vapor (reducida volatilidad) y alta viscosidad, como sucede con el petróleo combustible N° 5 y 6, el carbón mineral de diferentes clases y la leña, son sustancias que tienen una alta tasa de emisión de partículas por unidad de combustible quemado, siendo especialmente significativas para la leña y el carbón mineral. Al emplear estos últimos, la emisión de partículas está estrechamente asociada al contenido de ceniza de ellos.]

[Adicionalmente, tienen importancia en la producción de partículas, la presencia de aditivos tanto en los combustibles líquidos como gasolina y petróleo, como en los diferentes tipos de aceite que usan los motores de combustión interna, cuando éstos lo consumen, debido a un estado defectuoso, producto de una mantención deficiente. A modo de ejemplo están el plomo tetraetilo en la gasolina y compuestos de los elementos cinc, molibdeno y fósforo, presentes en algunos aceites.]

[Por último, la emisión de material particulado está estrechamente relacionada con la composición química de los combustibles, en especial es interesante destacar el contenido de azufre, de ceniza y de algunas sustancias o elementos provenientes del proceso productivo.]

[Los antecedentes entregados son aplicables tanto a la combustión externa como a la interna, cambiando solamente la cantidad a emitir según el proceso en estudio.]

[Por lo general, la combustión interna aporta una mayor cantidad de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{HC}$  que la externa; pero esta última contribuye con más partículas.]

[Por otra parte, los procesos de combustión incluyen a las fuentes fijas (calderas y hornos industriales) y móviles (vehículos gasolineros y petroleros).]

### Procesos industriales

[En este caso, las emisiones serán muy diferentes, dependiendo del proceso considerado] [Es así como en la industria aceitera las emisiones estarán aso-



ciadas a hidrocarburos gaseosos junto a las de las calderas cuando las haya.

Para procesos metalúrgicos, habrá emisiones de los hornos que estarán asociadas a partículas, en la mayoría de los casos, y a gases como CO en la fundición gris, si es que emplea horno de cubilote. También habrá partículas y NO<sub>x</sub> en el caso de horno eléctrico de arco.

[Otros procesos como la producción de pinturas, tienen emisiones de partículas correspondientes a los diferentes pigmentos utilizados para obtener los distintos colores, además emitirán hidrocarburos que forman parte de los solventes, en el caso de pinturas al aceite, lacas y barnices]

### Pérdidas por evaporación

[Dentro de estas fuentes se incluyen el recubrimiento de superficies, desengrase, litografía y distribución de combustibles, entre otras. En el caso del pintado de automóviles que utiliza lacas, la cantidad de solvente (HC) emitida al aire es equivalente a 77% en peso. Este fenómeno está presente en todos los procesos que emplean como medio de transporte o escurrimiento sustancias orgánicas como solventes, tal es el caso de pegamentos de uso doméstico e industrial, pinturas al aceite y barnices.] También es importante la distribución y venta de combustibles derivados del petróleo.

### Polvo levantado desde el suelo

[Es una de las formas de introducir partículas al aire, y ocurre cuando el suelo está erosionado o cuando hay apilamiento de minerales o materiales y el viento tiene velocidad del orden de 6 metros por segundo o superior. También sucede este fenómeno cuando circulan vehículos por calles y caminos de tierra o calles pavimentadas sucias.] situación frecuente en Santiago, que fue observada en forma clara en el período posterior al aluvión de Mayo de 1993.

## ESTIMACION DE EMISION DE CONTAMINANTES

[Para cuantificar las emisiones de contaminantes de una fuente cualquiera, se procede empleando las metodologías que se detallan a continuación:]

- ✓ Mediante balance de masas, generalmente usado para las emisiones de compuestos de azufre y como método de verificación de estimaciones.
- ✓ A través de mediciones en ductos de fuentes emisoras, empleando metodologías descritas por la US Environmental Protection Agency (USEPA), en forma especial para partículas o gases según el tipo de fuente.
- ✓ Usando factores de emisión de la USEPA. Report AP 42.
- Mediante el empleo de un factor especial, que puede ser el de la USEPA modificado, o uno de generación propia.



## OBTENCION DE INVENTARIO DE EMISIONES

[Para obtener un inventario de emisiones se requiere una serie de antecedentes que permiten, como producto final, estimar las emisiones globales de un área definida, dentro de los que destacan:]

- ✓ Catastro de fuentes emisoras por rubro o actividad.
- ✓ Caracterización del tipo de fuente, según clasificación fija o móvil. Desagregación para cada fuente por tipo de combustible.
- ✓ Características de diseño, modelo y año de fabricación del equipo emisor.
- ✓ Ciclo y horas de operación de los diferentes procesos involucrados en un rubro emisor.
- ✓ Consumo de materias primas y combustibles por unidad de tiempo. Composición química de éstas y propiedades físicas.
- ✓ Tipo de producto y cantidad diaria u horaria producida.

[Con estos antecedentes es posible obtener información sobre emisiones puntuales en cada rubro, a partir de ellas se logra una estimación de las globales para una zona específica. Con posterioridad, es posible dedicar la atención a problemas asociados a las actividades desarrolladas por fuentes emisoras que aportan cantidades importantes de contaminantes.]



## EMISIONES AL AIRE DE SANTIAGO

El aire en la ciudad de Santiago muestra la presencia de contaminantes de origen natural y antrópico en gases y partículas.

La emisión de gases y partículas de origen natural define las concentraciones de referencia o nivel background de contaminantes presentes en el aire de Santiago. En el caso de partículas totales en suspensión, han sido medidas concentraciones del orden de 100 µg/m<sup>3</sup>, Universidad de Chile, (1985) y de partículas de diámetro aerodinámico medio inferior a 10 micrones, PM10, valores medios de 55 µg/m<sup>3</sup> (H. Sandoval et al., 1990), en mediciones realizadas en Huelquén 1984 y Kalinka 1988, respectivamente.

Hasta la fecha no se dispone de información sobre concentraciones de referencia para sustancias gaseosas, que llegan al aire de Santiago como aporte natural o de fuentes lejanas.

## CONSUMO DE COMBUSTIBLES

Los procesos emisores antropogénicos más relevantes corresponden a los de combustión, dentro de los que destacan los de combustión externa con equipos como calderas, hornos, estufas de doble cámara y salamandras. Por otra parte, están los vehículos motorizados que emplean gasolina y petróleo diesel en combustión interna. En ambos procesos las emisiones dependen de las características del proceso de combustión, del tipo de combustible empleado y de la composición de éstos.

Actualmente, el país dispone de normas de calidad de combustibles líquidos en cuanto a contenido de azufre y de plomo para el caso de las gasolinas, pero no así para combustibles sólidos, como leña y carbón mineral. Por lo tanto, las emisiones serán función de las características de los combustibles empleados, mientras el país no fije regulaciones al respecto. A modo de ejemplo debieran estar la composición química de las gasolinas en relación al contenido de olefinas, parafinas, aromáticos; azufre en el carbón; humedad en el caso de la leña y la composición química del gas licuado y de cañería, junto al poder calorífico de todos los combustibles.

Dada la importancia y participación, que los procesos de combustión tienen en la contaminación atmosférica, es indispensable conocer el consumo de combustible empleado. En la Tabla 1 se presenta el consumo en la Región Metropolitana y en Santiago para diferentes años.

Tabla N° 4.1: Consumo anual de combustibles en Santiago

		1977 (1)	1981 (2)	1985 (3)*	1987 (4)	1990 (5)*
Leña	(ton)	15.240	S.I.	492.230	988.702	411.000
Carbón Mineral	(ton)	26.556	S.I.	240.000	53.246	441.548
Kerosene	(m³)	408.528	144.540	123.380	135.423	163.419
Petróleo Diesel	(m³)	146.364	219.468	443.854	352.834	791.724
Gasolina	(m³)	548.748	548.220	702.349	387.879	961.977
Petróleo N° 5	(m³)	198.024	174.192	50.075	47.883	275.870
Petróleo N° 6	(m³)			50.440	24.976	139.247
Gas Licuado	(m³)	S.I.	S.I.	434.729	450.819	505.678
Gas de Cañería	(10³m³)	S.I.	S.I.	108.471	100.610	99.480

S.I. : Sin información.

\* Corresponde al consumo de la Región Metropolitana.

Fuentes de información:

(1) INTEC-CHILE 1978; (2) IASA, 1981; (3) Hugo Sandoval L. (1985);

(4) Intendencia de la Región Metropolitana (1989);

(5) Elaboración propia con antecedentes de la Comisión Nacional de Energía (1992), ENACAR y Carbonífera Schwager S.A. (1993).

La tabla anterior presenta algunas singularidades que se analizan a continuación:

- Cabe destacar que los antecedentes del año 1985 y 1990 son para la Región Metropolitana y los de 1987 corresponden aproximadamente al 90% del área poblada de Santiago. Esto asegura algunas diferencias, pero las fuentes emisoras más importantes están incluidas en ese porcentaje y si no, igualmente tienen influencia sobre Santiago.
- Para el consumo de leña se observa un fuerte incremento entre 1985 y 1987, llegando a ser un factor 2 superior en el último año. Este aumento desmedido dio lugar a un estudio desarrollado por la Comisión Nacional de Energía entre 1990 y 1992 a través de INTEC-CHILE, que permitió mediante una encuesta obtener el consumo de leña en el gran Santiago para 1990, el cual es del orden del que había en 1985. Además este estudio entrega tasas de emisión por unidad de combustible quemado por diferentes equipos de uso actual en Santiago, con lo cual es posible estimar, en forma ajustada a la realidad, las emisiones provenientes de la quema de leña.
- El consumo de leña durante 1992 y 1993 debe ser inferior al de 1990, debido por una parte, a las restricciones impuestas por la autoridad competente y, por otra, al aumento del precio en el mercado, lo que hace menos recomendable su empleo por el bajo poder calorífico de este combustible.
- El carbón mineral muestra un marcado descenso de consumo en el año 1987, comparado con el año 1985. Las causas de esta diferencia, pueden deberse a una mala estimación en el año 1987 y, también a un cambio en los hábitos de consumo por variaciones en el precio de otros combustibles que los hacía más ventajosos. En cambio, para el año 1990, la diferencia está avalada por el consumo de este energético por fuentes emisoras que no operaban durante 1987.
- En el caso del kerosene, se observa en el año 1977, un consumo superior en más del doble al de los años posteriores, llegando a su valor más bajo en el año 1985. Esto es, debido a que en el año 1977 este combustible tenía menor precio para ser usado en calefacción. En los años siguientes el consumo fue disminuyendo en forma proporcional a su aumento de precio, hasta 1985. A partir de este año se incrementa linealmente con la población.
- El consumo de petróleo diesel y gasolina esta asociado al crecimiento del parque automotriz y también al mayor kilometraje recorrido por los vehículos de la locomoción colectiva, producto de la expansión urbana desregulada de la ciudad.
- Las fuertes diferencias en los consumos de petróleo combustible N° 5 y 6, a partir de 1981, están asociadas por una parte, a cambios de hábitos de consumo, puesto que hubo un período en que la demanda de leña aumentó significativamente, producto de su bajo precio, respecto a los otros combustibles. Por otra parte, con posterioridad al Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos, de la Intendencia de la Región Metropolitana (1989), se entregó una lista de empresas



contaminantes y se comenzó a vislumbrar, a nivel del empresariado, los problemas ligados al empleo de leña como energético, lo que probablemente junto al precio terminó por revertir el uso hacia derivados de petróleo.

- Finalmente, no hay que olvidar que el país ha experimentado un crecimiento que en el sector productivo ha significado la incorporación de nuevos procesos, y en algunos casos expansión de los que operaban anteriormente, lo que ha causado un mayor consumo de energéticos que se refleja en los valores presentados en la Tabla N° 4.1.

### EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFERICOS EN SANTIAGO

El parque industrial y automotriz de la ciudad de Santiago es reducido si se compara con el de otras ciudades como Ciudad de México y Sao Paulo. Sin embargo, la ciudad está sometida a concentraciones de contaminantes que son preocupantes por los niveles alcanzados. Ello, fundamentalmente, debido a las variables meteorológicas imperantes en el valle en que está inserta la ciudad.

Tal como se planteó en los puntos anteriores, los principales rubros emisores interactuantes en el aire de Santiago, están representados por los procesos de combustión externa, que se componen de calderas, hornos, estufas de doble cámara, salamandras, quema de basuras e incendios; procesos industriales del tipo de fundiciones metalúrgicas, de producción de alimentos, industria del cuero y calzado, industria química y de productos minerales, entre otros; pérdidas por evaporación asociadas a distribución de combustibles, recubrimiento de superficies, plantas de lavado en seco y uso de solventes; fuentes de combustión interna que comprenden motores estacionarios, automóviles, buses, taxibuses y maquinaria pesada; calles y caminos de tierra y pavimentados. Todos los rubros anteriores aportan gases y partículas, en proporciones variables, de acuerdo a su tamaño y período de operación.

En la Tabla N° 4.2, se muestran las emisiones globales estimadas para la Región Metropolitana (RM) del año 1990, obtenidas de información proveniente de la Intendencia de la Región Metropolitana (1989 y 1990), de la Comisión Nacional de Energía (CNE) (1992), del Report AP-42 de USEPA (1988) y consumo de combustibles especialmente preparado para este trabajo. Estas estimaciones han sido logradas considerando las emisiones brutas sin uso de tecnologías de abatimiento. La razón por la cual no se consideran los dispositivos para reducir emisiones se avala en el hecho de que no se dispone de las eficiencias determinadas por métodos de referencia de la USEPA, sino solamente con estimaciones del fabricante o con información de catálogo.

Tabla N° 4.2: Emisiones globales de contaminantes atmosféricos en la Región Metropolitana en 1990.

Fuentes	Contaminantes (ton/año)						Aldehídos (*)
	PTS	SOx	NOx	CO	COV	HAP	
Combustión Externa:							
Calderas, Hornos y Residencias	7.030	45.748	5.334	10.569	3.114	16	331
Combustión Interna:							
Fuentes Móviles	5.470	6.181	23.435	367.695	28.184	16	-
Procesos Industriales	4.510	13.885	64	1.650	7.890	-	-
Quema de Basuras e Incendios	440	26	160	2.380	850	-	-
Pérdidas por Evaporación	0	0	0	0	6.566	-	-
Polvo Calles (pavim. y de tierra)	33.950	0	0	0	0	-	-
Total anual	51.400	65.840	28.993	382.294	46.604	32	331

Fuente: Elaboración propia.

(\*) Sustancias determinadas en las partículas totales en suspensión (PTS).

Las emisiones totales de contaminantes para 1990 ascienden a 575.462 toneladas y considerando los antecedentes poblacionales y de superficie de la RM, se obtienen tasas de emisión por habitante y por kilómetro cuadrado 111.3 y 37178 Kg, respectivamente. En la Tabla 4.3 se presenta un detalle de la tasa de emisión de cada contaminante por habitante por día.

Tabla N° 4.3: Tasa de emisión de contaminantes por habitante en la Región Metropolitana.

Contaminante	g/día/persona
CO	203
SO <sub>x</sub>	35
PTS	27
COV	25
NO <sub>x</sub>	15



Los valores anteriores son del mismo orden de magnitud de los que presenta Sao Paulo, a pesar de que en esta ciudad, las emisiones de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{COV}$  y  $\text{SO}_x$  son de un orden de magnitud superiores y las de PTS del mismo orden, en cambio la población es 3,3 veces superior. Esto refleja que si las concentraciones medidas en el aire son inferiores a los niveles de Santiago, es debido a los factores meteorológicos imperantes en Sao Paulo, que favorecen la dispersión de contaminantes.

Por otra parte, la contribución porcentual de los diferentes rubros emisores a la contaminación de la Región Metropolitana se presenta en la Tabla N° 4.4.

**Tabla N° 4.4:** Contribución porcentual de emisión de contaminantes por rubro. Año 1990.

Tipo de fuentes	Contaminantes (%)						
	PTS	$\text{SO}_x$	$\text{NO}_x$	$\text{CO}$	$\text{COV}$	HAP	Aldehídos
Combustión Externa:							
Calderas, Hornos y Residencias	13,7	69,5	18,4	2,8	6,7	50,0	100,0
Combustión Interna:							
Fuentes Móviles	10,6	9,4	80,8	96,2	60,5	50,0	-
Procesos Industriales	8,8	21,1	0,2	0,4	16,9	-	-
Quema de Basuras e Incendios	0,9	0,0	0,6	0,6	1,8	-	-
Pérdidas por Evaporación	0,0	0,0	0,0	0,0	14,1	-	-
Polvo Calles (pavim. y de tierra)	66,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

De la tabla anterior, se observa que el aporte más significativo en partículas (66%), proviene del polvo de calles pavimentadas y de tierra, comprendidas en el área urbana de Santiago; en cambio, las calderas y hornos aportan del orden del 70% de  $\text{SO}_x$ ; para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{COV}$  las fuentes móviles contribuyen con el 81, 96 y 61%, respectivamente. Los Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), en un 50%, figuran como provenientes de combustión de leña al igual que los aldehídos, ello como consecuencia de las tasas de emisión obtenidas de CNE (1992). El resto de los HAP, corresponde a las fuentes móviles (SSA - Universidad de Chile, 1985).

En relación al Inventario real de Emisiones de Santiago (IES) de IRM (1989), las diferencias más significativas entre las estimaciones presentadas en este capítulo y las del IES corresponden en partículas al aporte de las fuentes móviles, en  $\text{SO}_x$  a la combustión externa y en  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{COV}$  a las fuentes móviles, siendo

mayor la participación entregada en la Tabla N° 4.2, para todos los casos, exceptuando  $\text{NO}_x$  que son un 10% inferior.

Las emisiones presentadas en Tabla N° 4.2, son estimaciones que provienen de aplicar factor de emisión de USEPA (Report AP-42), balance de masas y factores obtenidos por el IES para fuentes móviles.

Considerando que el parque automotriz aumentó, no se ha incluido el aporte de éste al polvo de calles, puesto que sólo se dispone de aproximaciones muy gruesas de factores de emisión y se ha estimado conveniente mantener las cifras proporcionadas por el IES, mientras no haya mejores antecedentes.

En las pérdidas por evaporación, solamente se han incrementado las correspondientes a la distribución de combustibles, dejando igual a las del IES el resto de las fuentes emisoras.

La información disponible para realizar las estimaciones de emisiones, está actualizada sólo hasta el año 1990.

### Análisis de las emisiones por rubro

De acuerdo a los antecedentes proporcionados en Tabla N° 4.2, es factible hacer una desagregación de los rubros emisores más importantes para cada uno de los contaminantes y comentar su participación, según el detalle que se presenta a continuación:

#### Caso partículas

El rubro más relevante en este caso lo representan las calles y caminos de tierra y pavimentadas correspondientes al 90% del área urbana de Santiago (IRM, 1989). Sobre el tema se puede comentar, por una parte, el aporte que hacen las calles de tierra equivalente al 66% (IRM, 1989) de las emisiones de polvo, lo cual puede haber cambiado en la actualidad como consecuencia de la campaña de pavimentación implementada en los últimos años, aún así se estima que en el área urbana de Santiago falta por pavimentar alrededor de 700 Km. En la Figura N° 4.1, se presentan los requerimientos de pavimentación en los diferentes sectores de la ciudad, indicando las zonas con mayor déficit en la red vial secundaria (O'Ryan 1993). Se observa en la figura que el sector antiguo de la ciudad, constituido por las comunas de Santiago, Providencia, Ñuñoa y San Miguel, así como parte del nuevo, integrado por Las Condes y La Reina, tienen un alto porcentaje de calles pavimentadas. El resto de las comunas, especialmente del sector periférico, presentan una muy baja cantidad de calles pavimentadas. Estos antecedentes indican que el transporte público y privado, es un potencial emisor de partículas cuando circula por vías sin pavimentar.

En las emisiones de polvo de calles han sido incluidas 1200 toneladas, provenientes de otras actividades menores (IRM 1989)

En cuanto a las calles pavimentadas con aporte del 34% (IRM, 1989) en las emisiones de calles, destacan una serie de aspectos que se comentan a continuación. En primer lugar figura el hecho de que en el sector alto de la ciudad hay carencia de



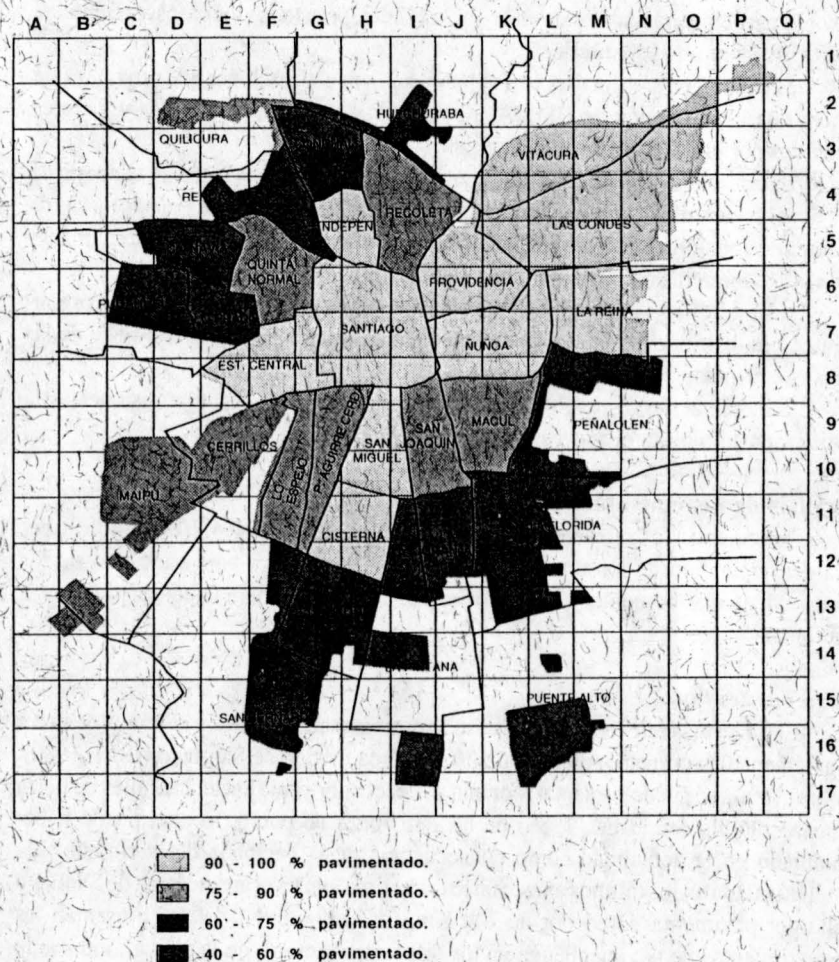


Figura N°4.1: Distribución porcentual de calles pavimentadas por comuna en Santiago.

colectores de agua lluvia y muchas arterias de alta densidad de tránsito vehicular se inundan cuando llueve, quedando una capa de tierra sobre ellas que, con posterioridad a la lluvia, si no es removida de alguna forma, será molida y reinyectada a la atmósfera por la circulación de los vehículos. Este aspecto es singular de Santiago y no sucede en otras zonas del país con alto nivel de precipitaciones, porque el crecimiento de esas ciudades consideró esta variable, además en Santiago juega un rol importante la pendiente que presenta la ciudad en el sector alto y la proximidad a los faldeos cordilleranos. Otro punto que tiene un rol importante está asociado a la existencia de calles pavimentadas sin solera y con berma de tierra, lo cual conduce a que después de una lluvia la tierra quede en la calle y sea eliminada por reinyección al aire con el paso de los vehículos. También destacan en este caso el estado de mantención y la renovación del pavimento, que en algunas arterias es muy deficitaria.

La solución de estos problemas no es fácil y tiene un alto costo. Esto condujo a la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM) a licitar un estudio que entregue una clasificación de las vías según su estado, formas de aminorar el problema mediante diferentes alternativas tecnológicas y una estimación de factores de emisión para calles pavimentadas y de tierra que permitan finalmente hacer una estimación, ajustada a las condiciones de Santiago, de las emisiones de partículas de diferentes tipos de calle. Hasta la fecha todas las emisiones informadas carecen de verificación, por lo tanto el aporte de este estudio debiera ser significativo.

#### Caso $SO_x$

A diferencia del IES, las estimaciones de emisiones de  $SO_x$  y su aporte porcentual presentados en las Tablas N° 4.2 y 4.3, respectivamente, indican que la combustión externa aporta aproximadamente un 70%, siendo mayoritariamente importante la participación de los combustibles carbón y petróleos N° 5 y 6. Como segundo rubro están los procesos industriales que en el IES eran los que hacían el mayor aporte a las emisiones de  $SO_x$ .

Las diferencias encontradas indican que las emisiones cambian con el tiempo y es muy necesario disponer de una actualización real de emisiones y del consumo de combustible para verificar resultados.

Estas sustancias son responsables, en parte, de las concentraciones de sulfatos medidos en las partículas respirables de Santiago, que superan la norma de calidad de aire existente en California (IRM 1990).

#### Caso $NO_x$ , COV y CO

Al igual que en el IES y como sucede en todos los grandes complejos urbanos, las emisiones vehiculares contribuyen con el porcentaje más alto de estos contaminantes a la atmósfera. En el caso de los automóviles y vehículos de locomoción colectiva el aporte se presenta en Tabla N° 4.5.



Tabla N°4.5: Distribución de emisiones en fuentes móviles.

Vehículos	PTS	Contaminantes (ton/año)				
		SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	COV	CO	HAP(*)
Automóviles	1.808	2.136	15.193	25.993	356.403	0,8
Buses y Taxibuses	3.662	4.044	8.242	2.191	11.291	15,3
Total						
General	5.470	6.180	23.435	28.184	367.694	16

(\*) Los HAP han sido determinados en las PTS.

La Tabla N° 4.5, muestra que la locomoción colectiva, que es un 100% diesel, aporta un 67% de PTS y un 65% de SO<sub>x</sub>, y 96% de los HAP, los automóviles, en cambio, contribuyen con 65, 92 y 97% de NO<sub>x</sub>, COV y CO, respectivamente, de los contaminantes emitidos por el parque automotriz de la Región Metropolitana.

A partir de septiembre de 1992 los automóviles nuevos que circulan por las Regiones V, VI y Metropolitana deben estar equipados de convertidor catalítico, esto conduce a que en la actualidad los vehículos gasolineros tengan una menor contribución porcentual a las emisiones de gases tales como NO<sub>x</sub>, CO y COV. Para los compuestos de azufre, básicamente SO<sub>2</sub>, con el uso de convertidores catalíticos aparece un nuevo contaminante, debido a que un porcentaje aproximado al 80% del SO<sub>2</sub> es transformado en sulfuro gaseoso, que es detectado por el olfato cuando se está detrás de un automóvil con este tipo de dispositivo. Esta última sustancia al igual que el SO<sub>2</sub> es transformado, en la atmósfera, en otros compuestos de azufre como aerosoles sulfato y ácido sulfúrico. El hecho de que los convertidores transformen los SO<sub>x</sub> en sulfuros es una consecuencia del diseño de los equipos, puesto que en USA y Japón no se observa este fenómeno. Luego la causa última corresponde a la ausencia de regulaciones en las emisiones de estos dispositivos y de características definidas en cuanto a tipo, modelo y condiciones de operación.

[La imposición de los convertidores catalíticos está asociada a disponer de gasolina sin plomo tetraetilo, debido a que el plomo envenena la superficie activa del equipo. Esto es una externalidad del sistema puesto que lleva a eliminar el plomo en la gasolina y por lo tanto sus emisiones al aire. Sobre cómo se elimina este aditivo, es necesario fijar criterios con el fin de que no sea peor el remedio que la enfermedad, si es que la forma de sustituirlo es a través del aumento del contenido de hidrocarburos aromáticos en la gasolina.]

Por otra parte, las emisiones vehiculares han sido estimadas con factores de emisión provenientes del IES (1989) y no consideran la reducción que hacen los

convertidores, en el caso de los gases, puesto que el país no dispone de equipos que permitan verificar su eficiencia y controlar la vida útil de ellos a tiempo real.

### Caso HAP y aldehídos

Las emisiones de estas sustancias presentadas en la Tabla N° 4.2, corresponden a las de combustión de leña en hornos, calderas y equipos de calefacción doméstica, contenidas en el estudio desarrollado por la CNE entre 1990 y 1992 a través de INTEC-CHILE, y a estimaciones provenientes de la Tabla N° 4.6 (Servicio de Salud del Ambiente Región Metropolitana - Universidad de Chile, 1985).

Ambas sustancias son incluidas por primera vez en las emisiones de la Región Metropolitana. La razón de ello se avala, en primer lugar por el efecto nocivo para la salud humana de algunos de los HAP o de los productos de las transformaciones que éstos compuestos experimentan en el aire, dentro de los que destacan los nitroderivados, entre otros. Como segundo punto están los aldehídos que son perjudiciales para la salud y también son muy reactivos en el smog fotoquímico, dando origen a radicales y átomos que participan en los procesos de transformación de COV, NO y SO<sub>2</sub> en la atmósfera baja. Algunos aldehídos son lacrimógenos fuertes, siendo fácilmente percibidos por las molestias oculares creadas por ellos, situación frecuentemente observada en Santiago durante el invierno en el sector central y en Providencia.

[Los HAP están constituidos por varios anillos con átomos de carbono que dan lugar a sustancias de peso molecular y punto de ebullición alto. Como los gases de combustión salen a temperaturas elevadas, los HAP son emitidos en estado gaseoso y adsorbidos a partículas de carbón producidas por una mala combustión. El carbón los adsorbe fácilmente puesto que tiene un gran poder de retención proveniente de la alta superficie de estas partículas. Cuando el proceso aporta HAP como gases, éstos pueden condensar o adsorberse al carbón presente en las partículas contaminantes en el aire.]

[El estado físico de los aldehídos emitidos es mayoritariamente gaseoso y, en los de alto peso molecular líquido, éstos últimos son menos participativos en las emisiones.]

### Características físicas y químicas de las emisiones

En los puntos precedentes se han entregado los antecedentes relacionados a las cantidades emitidas y las diferentes formas de producción de ellas. Sin embargo, no se han comentado otras características de interés en contaminación atmosférica, como la distribución de tamaño y composición química de las partículas emitidas, así como la presencia de sustancias gaseosas o sólidas que salen por los ductos y que no son medidas o no tienen normas o regulaciones.

[Dentro de las sustancias gaseosas que no tienen normas se encuentran una serie de compuestos orgánicos como benceno, tolueno y sus derivados junto a algunos de los HAP, aldehídos en general, sustancias ácidas como cloruro de hidrógeno y halógenos; derivados de azufre como sulfuros orgánicos (mercaptanos odorizantes



del gas licuado) e inorgánicos como compuestos de nitrógeno, por nombrar algunos. En este caso, si bien no se dispone de normas, es posible determinar las cantidades emitidas y a partir de ellas inferir los problemas que puede generar la presencia de ellas en el aire.

[Otra característica relevante en las emisiones tiene relación con la composición química de las partículas emitidas, especialmente cuando contienen sustancias tóxicas, como arsénico, cadmio, plomo, mercurio, sulfatos y HAP. En la Tabla N° 4.6, se muestran antecedentes de la composición química de las partículas emitidas por algunas fuentes emisoras, (Servicio de Salud del Ambiente-Universidad de Chile 1985).]

Tabla N° 4.6: Caracterización química cuantitativa de partículas de fuentes emisoras.

Especie		Caldera, Carbón (1)	Caldera Petróleo 5 (1)	Ciclo Otto (1)	Ciclo Diesel (1)	Combustión Leña (2)
Carbono total	%	15,2	41,4	35,4	59,6	
Azufre Total	%	6,6	8,7	0,6	1,3	
Sulfato	%	4,9	23,4	1,2	2,0	
Plomo	%	0,2	0,2	34,5	0,2	
HAP Tot. (1)	%	0,004	0,008	0,04	0,42	
HAP Tot. (2)	%					0,68
Pireno	ppm	13,8	1,6	193,3	2987,0	
Criseno	ppm	1,6	nd	46,4	370,0	
Benz(α)						
Antraceno	ppm	1,7	5,8		79,4	
Perileno	ppm	16,5	2,6	21,8	79,3	
Benz(α)						
Pireno	ppm	0,4	2,6	70,0	92,5	
Benz(ghi)						
Perileno	ppm	4,5	65,5	90,4	576,3	

nd : no detectado.

Fuente:

(1) Servicio de Salud del Ambiente R.M. - Universidad de Chile (1985).

(2) Comisión Nacional de Energía (1992).

La tabla anterior indica cómo afectan a la contaminación las emisiones de partículas según las fuentes de origen [Se observa que el plomo viene en forma casi exclusiva de vehículos gasolineros, los HAP fundamentalmente de combustión de leña y vehículos diesel, el carbono de vehículos diesel, calderas a petróleo y vehículos gasolineros. Cabe recordar que los HAP están adsorbidos al carbón y por lo tanto, a mayor contenido de éste, más alto serán los HAP] lo cual concuerda con la Tabla N° 4.6, puesto que los vehículos diesel presentan las cantidades más elevadas de HAP y carbono, junto a la combustión de leña en calderas, hornos y equipos de calefacción.

Los HAP totales (1) fueron medidos en partículas colectadas por un método diferente al de referencia de la USEPA.

Los HAP totales (2), están determinados en partículas muestreadas según método de referencia.

El contenido de azufre total que incluye a los sulfatos es directamente proporcional al porcentaje de azufre en el combustible, el cual es superior en un factor 2 en el petróleo 5 que en el carbón, de acuerdo a los combustibles usados en las calderas al momento de tomar las muestras.

En relación al porcentaje de sulfatos en las partículas hay que destacar que no puede ser superior a 3 veces el azufre, si es que todo el azufre estuviera como sulfato. Esto es una consecuencia de la relación entre los pesos atómicos y moleculares de las especies involucradas.

Otra característica de alta incidencia en los efectos de los contaminantes atmosféricos y en la respirabilidad de las concentraciones de partículas medidas en el aire de Santiago, tiene relación con el diámetro de las partículas emitidas. Al respecto, se puede decir que de estudios microscópicos (Universidad de Chile-Servicio de Salud de Ambiente, 1985) y de información de la literatura especializada, se observa que en las emisiones de vehículos diesel las partículas tienen un diámetro inferior a 2 micrones y están dentro de las que tienen 100% de respirabilidad. Esta es la razón por la cual se han aplicado y deben continuar implementándose exigencias de calidad y control en este tipo de vehículos, porque tienen una fuerte incidencia en la salud humana, especialmente si es considerado el porcentaje de HAP [Los vehículos del ciclo Otto (gasolineros) emiten partículas de tamaño respirable, pero en menor proporción que los diesel. Las calderas a carbón y petróleo aportan partículas de mayor tamaño, especialmente las últimas, pero debido a procesos de aglomeración que suceden con ellas.]

[Un caso especial lo constituye la combustión de leña, que emite partículas con diámetro inferior a 2 micrones también con 100% de respirabilidad y con alto contenido de HAP, siendo, por lo tanto, un proceso contaminante que requiere de exigencias y normas muy estrictas por los problemas de daño a la salud humana.]



## CONCLUSIONES

[Las emisiones de partículas provienen mayoritariamente de calles y caminos de tierra y pavimentados.]

[Los hidrocarburos aromáticos policíclicos son aportados en proporciones iguales por vehículos diesel (locomoción colectiva) y por combustión de leña. Esto justifica aplicar un riguroso control a estas fuentes emisoras.]

[El mayor aporte a los óxidos de azufre corresponde a procesos de combustión externa, por lo tanto los combustibles de uso en Santiago debieran tener normas especiales de composición. Estos óxidos son responsables de una alta proporción de las concentraciones de sulfatos presentes en el aire.]

[Los vehículos gasolineros son causantes de las mayores emisiones de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono. Las dos primeras sustancias participan en el smog fotoquímico, por lo tanto es necesario reducir sus emisiones.]

[La implementación de regulaciones que obliguen a las fuentes emisoras a instalar dispositivos de abatimiento de emisiones, requiere de la capacidad técnica del estado para certificar su funcionamiento y eficiencia.]



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Comisión Nacional de Energía (1992) "Determinación de las emisiones de contaminantes provenientes de la quema de leña en el área metropolitana de Santiago". Desarrollado por Intec-Chile.
- Iasa-Fac Cs. Fís. y Mat. U. de Chile (1981) "Estudio de impuestos a la emisión de contaminantes de aire y agua en la Región Metropolitana" J. Escudero O., H. Sandoval L., P. Ulriksen U. y otros.
- Intec-Chile (1978) "Programa para el control de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana".
- Intendencia de la Región Metropolitana (1989) "Universo de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos e inventario real de emisiones para Santiago. Desarrollado por Cade-Idepe.
- Intendencia de la Región Metropolitana (1990) "Sistema de Derechos de Emisión de Contaminantes Atmosféricos", realizado por la Universidad de Chile e Intec-Chile.
- Intendencia de la Región Metropolitana (1990) "Estudio de Evaluación de Sulfatos en Aerosoles de Santiago". H. Sandoval L. y P. Toro E., Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- O'Ryan, Raúl (1993). "Cost Effective Policies to Improve Urban Air Quality in Developing Countries: Case Study for Santiago, Chile". Dissertation PhD Thesis University of California, Berkeley.
- Sandoval L., Hugo (1985) "Contribución de las Fuentes Emisoras a la contaminación atmosférica de Santiago" IV simposio de contaminación ambiental. Tomo II pp. 37-42.
- Sandoval L., Hugo y Martínez A., Manuel (1990) "Determinación y Comportamiento de las partículas en suspensión y respirables en Santiago de Chile". XIX Congreso Latinoamericano de Química. Buenos aires-Argentina.
- Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana (1985) "Estudio de caracterizaciones físicas y químicas de partículas en suspensión en la Región Metropolitana". Desarrollado por Universidad de Chile. Caracterización de fuentes emisoras. Sandoval L., Hugo.
- U.S.A. Environmental Protection Agency (1988). "Compilation of air pollutant emission factors". Report AP 42.





*CAPÍTULO 5*  
**CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES  
ATMOSFÉRICOS**

*Margarita Préndez B.*

*Características de los contaminantes atmosféricos 111*

*Los gases 116*

*Material particulado 141*

*Consideraciones finales sobre el comportamiento de algunos  
de los contaminantes cuantificados en Santiago 177*

*Referencias bibliográficas 182*

*La autora desea agradecer la cooperación dada por los señores Pablo Daud, de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, e Ignacio Olaeta, del Servicio de Salud del Ambiente, para la adquisición de parte de la información presentada y de su elaboración gráfica.*



## CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS

[Los contaminantes emitidos desde sus fuentes, una vez que se liberan a la atmósfera, se constituyen en parte integrante de ella. Algunos, los más inertes, como por ejemplo los clorofluorocarbonos, se mantienen inalterados y se dispersan horizontal y verticalmente en la atmósfera, alcanzando lugares remotos y siendo capaces de provocar, incluso, la contaminación global del planeta. Otros, más reactivos, se transforman en la atmósfera a medida que se difunden en ella, convirtiéndose en compuestos (contaminantes secundarios) que pueden resultar aún más tóxicos que aquéllos que les dieron origen (contaminantes primarios). Unos y otros pueden ser removidos desde la atmósfera por diferentes procesos y llegar, posteriormente, a contaminar aguas y suelos, así como también a ocasionar daño directo al ambiente construido y a los sistemas biológicos.]

[Algunos de los contaminantes más difundidos son gases, tales como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, el ozono, parte de los hidrocarburos saturados e insaturados, alcoholes, aldehídos, cetonas y ciertos compuestos halogenados, entre otros.]

[Otro elemento contaminante importante es el material particulado, que puede incluir diferentes compuestos tóxicos de tipo inorgánico, como el plomo y el cadmio, o de tipo orgánico, como el benzo(a)pireno o el nitrato de peroxiacetil (PAN).]

[La mezcla de contaminantes en el aire nunca es constante ni simple y el daño que se puede observar en una situación particular es, con frecuencia, el resultado de la acción conjunta de diversos contaminantes. En ciertos casos, ocurre una interacción sinérgica, en la cual el efecto total corresponde a un valor mucho mayor que la suma de los efectos individuales de los contaminantes que participan. De este modo, resulta claro que la evaluación de la contaminación de una ciudad debe

■ **Margarita Préndez Bolívar**  
Químico Universidad de Chile,  
Master en Ciencias Nucleares  
y Radio Protección de la Universidad  
de Louvain-La-Neuve de Bélgica.  
Doctora en Ciencias con mención  
en Química Nuclear, post doctorado  
en aerosoles atmosféricos en NASA,  
AMES, Research Center en Estados  
Unidos, miembro del Comité Científico  
Internacional para la Evaluación de la  
Capa de Ozono Estratosférico, Consultor  
de Naciones Unidas en el tema del Ozono  
Atmosférico, Revisor y/o Co-autor de:  
Scientific Assessment of Estratospheric  
Ozone en 1989, Scientific Assessment  
of Ozone Depletion, 1991; Educación  
ambiental hacia el desarrollo de una  
conducta ecológica en Chile, 1982.  
Profesor Titular, Facultad de Ciencias  
Químicas y Farmacéuticas, Universidad  
de Chile. Docencia en Radioquímica,  
Química Nuclear y Contaminación  
Atmosférica a nivel de pre y postgrado.



basarse en el conocimiento de la composición del aire en diferentes puntos de ella (estaciones de monitoreo).]

[Los contaminantes del aire, aun desde la fuente misma de emisión, se encuentran presentes en concentraciones bajas, si éstas se comparan con los grandes volúmenes del gas de arrastre inerte. Posteriormente, ellos sufren una nueva dilución en la atmósfera, de tal modo que cualquier acción de control que se desee implementar debe considerar una evaluación del contaminante en la fuente misma o tan cerca de ella como sea posible. De esta forma, la localización de las estaciones de monitoreo o de control debe determinarse cuidadosamente. Debe tomarse en cuenta que, las condiciones meteorológicas influyen directamente en el proceso de transformación en el lugar específico de muestreo.]

Pocos años atrás, la medición de los contaminantes sólo se realizaba sobre la base de cantidades promedio determinadas en el aire durante un cierto tiempo. A partir de ellas, se establecían las tendencias de los niveles de contaminación a largo plazo.

[Actualmente, varios países han establecido sistemas de medición prácticamente instantáneos, que permiten, mediante una red de estaciones de monitoreo, conocer los niveles de contaminantes en tiempo real. La ventaja de los nuevos sistemas es evidente cuando se trata de realizar el control de emisiones, en especial de ciertas fuentes claramente individualizadas.]

No obstante, los métodos tradicionales se continúan utilizando, no sólo por su menor costo, sino también porque permiten un análisis posterior más fino, acabado y completo, especialmente en cuanto a la composición química del material particulado y a la separación y cuantificación individual de los hidrocarburos gaseosos.

En nuestro país se han utilizado tradicionalmente los métodos clásicos para la determinación de gases y de partículas a través de la Red de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), instalada en 1964, y de las dos redes de monitoreo del Servicio de Salud del Ambiente: la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire, que opera desde 1978, y la red automática o red MACAM, que opera desde Enero de 1988, para analizar el material particulado y algunos gases, además de algunas variables meteorológicas.

Recientemente, se han establecido dos sistemas de determinación instantánea para la cuantificación de gases y partículas con normas de calidad del aire. Uno, en 1992, para el material particulado menor de 10 µm, y el otro, en 1993, con dos estaciones móviles donadas por el Gobierno de Holanda.

En la Tabla 5.1, se señala la ubicación de los puntos de muestreo de las estaciones actualmente en funcionamiento y las variables monitoreadas en las redes de vigilancia y automática.

Tabla N° 5.1: Ubicación de los puntos de muestreo y las variables monitoreadas en las redes de vigilancia y automática.

Estación	Dirección	Variables Medidas
<b>Red de Vigilancia</b>		
# 3	Mac Iver 541 PTS(*), NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>	Indice de Suciedad, Indice de Acidez,
# 6	Pedro de Valdivia 963	PTS, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Polvo Sedimentable
#10	Marathon 1000	PTS, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Polvo Sedimentable
#11	Independencia 3450	PTS, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Polvo Sedimentable
#12	Teniente Cruz 1087	PTS, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub>
#13	Providencia 200	PTS
#14	Cooperativa José Maza	PTS, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , Polvo Sedimentable
<b>Red Automática</b>		
EMA	Plaza Alm. L. Gotuzzo	PM10(**), CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCT(***)
EMB	Parque Gran Bretaña (Providencia 200)	PM10, CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCT y var. meteorológicas.
EMC	Clínica Psiquiátrica (Av. La Paz 1003)	PM10, CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCT y var. meteorológicas.
EMD	Parque O'Higgins (Tupper/Pza. Ercilla)	PM10, CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCT y var. meteorológicas.
EMM	Estadio Las Condes (Av. Las Condes 11755)	PM10, CO, SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> , HCT, CH <sub>4</sub> y variables meteorológicas.

(\*) PTS = Material particulado en suspensión menor de 45 µm.

(\*\*) HCT = Hidrocarburos gaseosos totales.

(\*\*\*) (PM10) = Material particulado en suspensión menor de 10 µm.

La ubicación de las diferentes estaciones de monitoreo se indican sobre el mapa de la ciudad de Santiago.

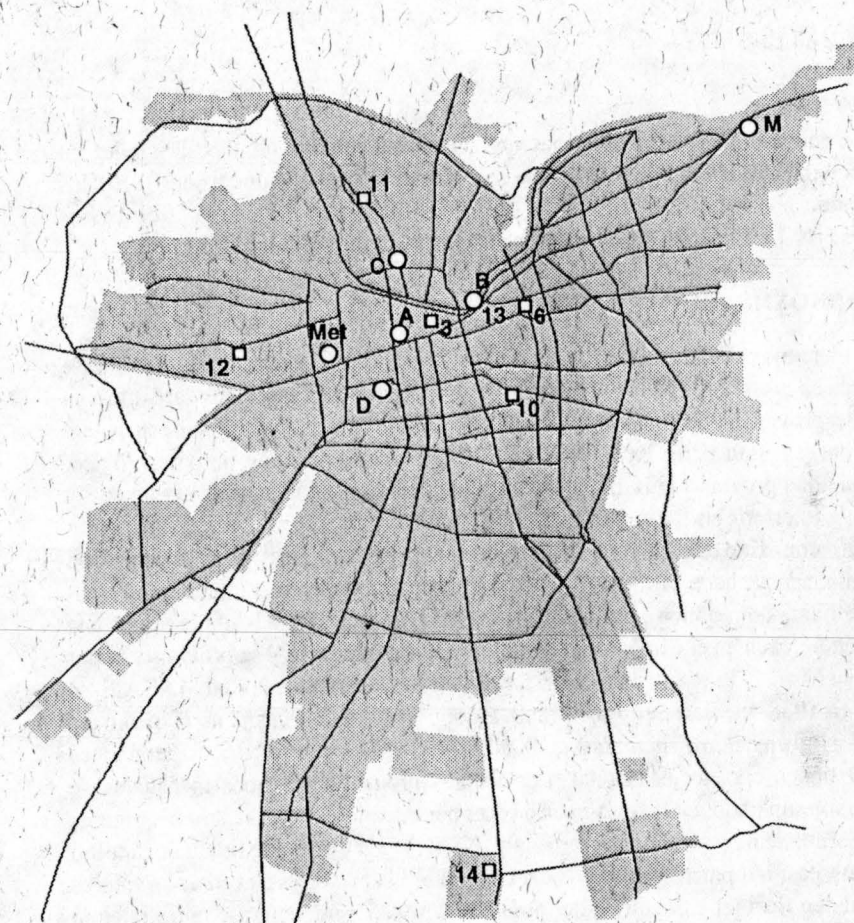
En la práctica, no está bien definida la asociación entre efectos y concentraciones de contaminantes, esto es, los criterios de contaminación del aire. Esto se debe, fundamentalmente, al gran número de variables que participan, pero también al hecho de que, al no poderse efectuar estudios de laboratorio sobre seres vivos, es preciso interpolar, extrapolar y observar efectos ya ocurridos, mecanismo lento y que muchas veces induce a confusión.

En los últimos años, Santiago se ha ubicado entre las ciudades de mayor contaminación atmosférica del mundo. La causa principal de ello radica en una alta tasa de emisiones antropogénicas, aún no del todo identificadas ni controladas, además de una situación geográfica desfavorable que impide la dispersión horizontal y vertical de los contaminantes.

En líneas generales, en los estudios efectuados en Santiago sobre los contaminantes mismos, el énfasis se ha puesto en los gases y aerosoles primarios. Respecto de los aerosoles secundarios, la información disponible es mucho más reducida y parcial (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7), como para ser usada en la aplicación de medidas de control. Por ello, en parte al menos, las medidas implementadas en los últimos años por la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM), tendientes a lograr la reducción de las emisiones, no han dado todos los resultados esperados.

Entre los contaminantes primarios que afectan la calidad de vida de la ciudad, destacan, en orden de toxicidad potencial, los aerosoles atmosféricos y los gases primarios, procedentes principalmente de los procesos de combustión a altas temperaturas, en fuentes móviles estacionarias. Los aerosoles secundarios, que han sido menos estudiados, representan una parte importante, especialmente en los períodos fríos (2, 4, 6, 7).

Los principales aspectos que se deben considerar para el muestreo y análisis químico de gases y aerosoles, son la instrumentación necesaria para efectuar las mediciones, el funcionamiento y calibración del mismo, las limitaciones propias del instrumento utilizado, la variación temporal de las variables atmosféricas y de las emisiones de los contaminantes primarios y, finalmente, las transformaciones de los contaminantes en la atmósfera y las velocidades de las reacciones involucradas (8, 9, 10).



Mapa de ubicación de puntos de muestreo de contaminantes atmosféricos y meteorología de las redes de monitoreo de Santiago.



## LOS GASES

Teniendo en cuenta los gases que son monitoreados por las dos redes en operación, entre los gases primarios, se analizarán el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y los hidrocarburos totales (HCT). Entre los gases secundarios, se describirá el ozono (O<sub>3</sub>).

### EL MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

[El monóxido de carbono natural es un componente menor del aire seco. Se produce en la combustión incompleta del carbono y de sus compuestos derivados, ya sea que provengan de fuentes naturales o antrópicas. En el aire urbano, su fuente principal es el transporte. Es un gas incoloro, inodoro y no irritante, pero muy tóxico. Su toxicidad proviene de la alta afinidad para combinarse con la hemoglobina de la sangre e interferir en el proceso normal de respiración.]

El monóxido de carbono ha sido cuantificado en Santiago de forma instantánea y continúa desde hace varios años. Las primeras mediciones en continuo se efectuaron mediante un monitor controlado por el Servicio de Salud del Ambiente, en una estación ubicada en el campanario de la Iglesia de La Merced y se prolongaron por unos pocos años. El registro continuo en las cinco estaciones de la Red MACAM, se inició en 1988, mediante el principio de absorción de luz infrarroja no dispersiva.

La información disponible para Santiago (11), muestra que las concentraciones de CO tienen carácter estacional. Los valores promedio máximos mensuales de verano son superados entre tres y cuatro veces por los valores observados en los meses de invierno, de mayo a agosto (ver Figura N° 5.1), con cifras que fluctúan en torno a 2 ppm y casi 16 ppm, respectivamente. La variabilidad diaria es elevada, con valores que pueden fluctuar entre cifras del orden de 0,5 y 25 ppm, como se muestra en la Figura N° 5.2.

Los valores promedio móviles, contabilizados desde diciembre de 1989, hasta febrero de 1993, considerando las cinco estaciones de la Red MACAM, se observan en la Figura N° 5.3, la que muestra una ligera disminución de las concentraciones en el tiempo, tanto para los valores promedio como para los valores máximos. Esta conclusión está confirmada con una confiabilidad del 95%, mediante el test de hipótesis nula. Nótese que los valores considerados en estas curvas corresponden a los promedios de 8 horas y varían en torno a 5 ppm en el caso de los promedios y en torno a 7 ppm en el caso de los promedios máximos.

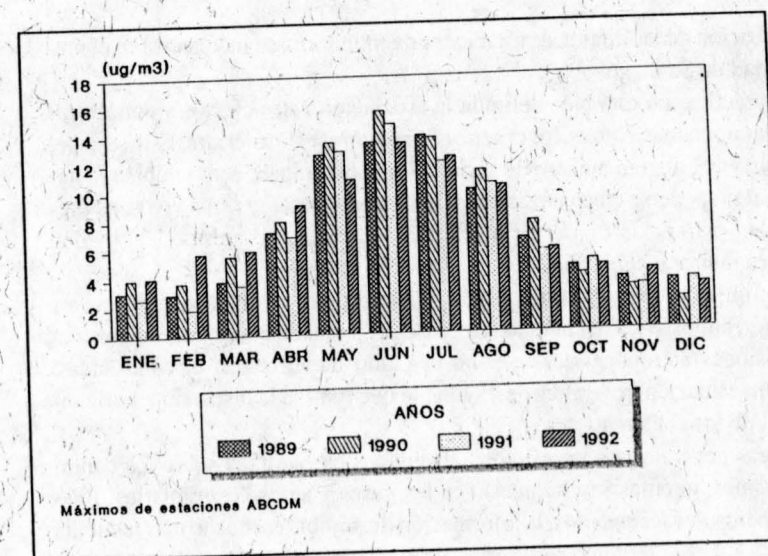


Figura N° 5.1: Concentraciones máximas mensuales promedio de monóxido de carbono a partir de 1989, para las diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

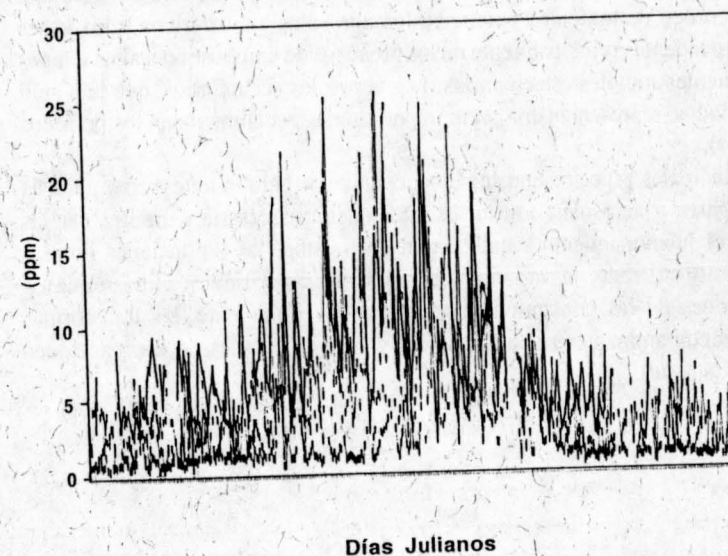
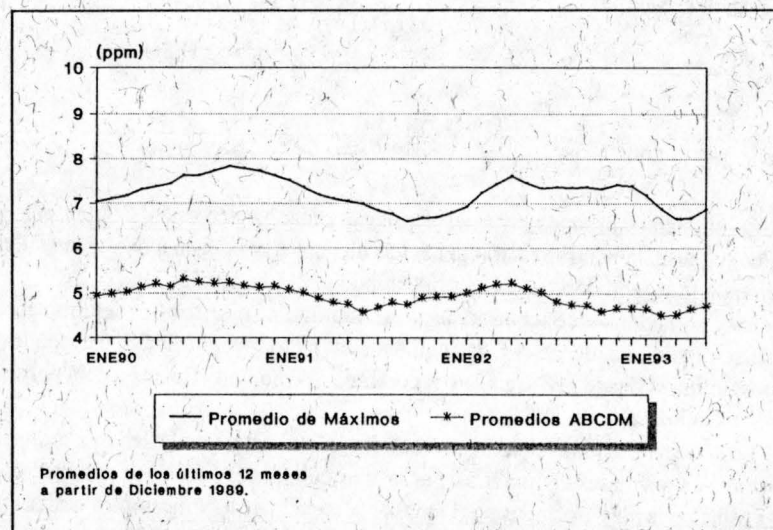


Figura N° 5.2: Concentraciones diarias de monóxido de carbono durante 1992, para las diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



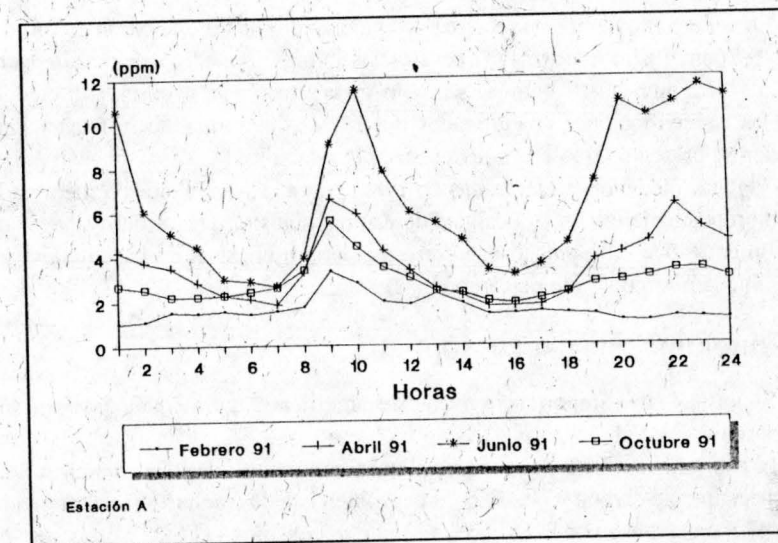
**Figura N° 5.3:** Concentraciones mensuales móviles promedio y máximos móviles promedio de monóxido de carbono a partir de 1989, para las diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

La Figura N° 5.4, muestra que el perfil de las concentraciones a lo largo del día, para meses típicos de las diferentes épocas del año 1991 en la estación A, corresponde a una curva con dos máximos, situados, el primero, entre las 07 y 12 horas y, el segundo, entre las 18 horas del mismo día y las 02 horas del día siguiente, con valores que alcanzan casi los 12 ppm. Los mínimos muestran concentraciones frecuentemente menores a 4 ppm. En general, estas observaciones se repiten en todas las estaciones de la red MACAM, en cuanto a la forma de las curvas y también, aproximadamente, en cuanto a los valores de las concentraciones.

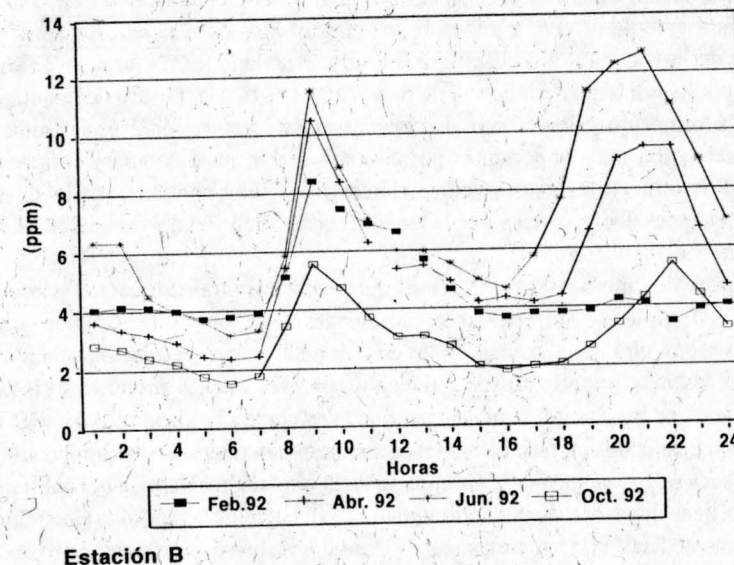
La Figura N° 5.5, muestra las concentraciones horarias promedio cuantificadas durante 1992, en la estación B. En esta estación se repite una situación similar a la de la estación A, excepto que los máximos, en particular el de la tarde, están más claramente definidos, reflejando el aumento del flujo vehicular en el área, derivado del traslado de la población hacia y desde sus lugares de trabajo.

Durante todo el año 1992, se observó un aumento de las concentraciones con respecto a 1991. En especial es notable el aumento durante el mes de febrero, donde los valores máximos crecieron de 2,5 a 8,5 ppm. Esto no resulta contradictorio si se considera que los promedios móviles mostrados en la Figura N° 5.3, y el test de hipótesis nula realizado, reflejan una tendencia de más largo plazo.



**Figura N° 5.4:** Concentraciones horarias promedio mensuales de monóxido de carbono, para la estación A de la red MACAM, durante 1991.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



**Figura N° 5.5:** Concentraciones horarias promedio de monóxido de carbono, para la estación B de la red MACAM, para meses representativos de las distintas épocas del año 1992.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



Algunas mediciones efectuadas en 1989, en una estación situada fuera de la ciudad propiamente tal, en la localidad de Kalinka, mostraron concentraciones que variaron entre 0 y 2,2 ppm, lo que correspondería a un nivel de base de aire no contaminado por monóxido de carbono (12).

Es un gas cuya importancia puede ser significativa, principalmente por sus efectos sobre la salud.

[Por la transformación descrita, el  $\text{SO}_2$  puede tener efecto a cientos de kilómetros de su fuente de origen, a través de los mecanismos de depositación seca, generación de lluvia ácida u oxidación a sulfato particulado por la influencia de las nubes o por la radiación de longitud de onda corta (15, 16, 17). Dentro de la química que rige la formación de los sulfatos, los mecanismos de conversión y sus velocidades de formación son muy importantes por el considerable impacto sobre el ambiente (18). Por otra parte, estos factores pueden ser importantes también en las transformaciones que ocurren sobre los medios de recolección del particulado y por ende sobre su cuantificación.]

(Los mecanismos en fase heterogénea son preponderantes a bajas temperaturas y humedades relativas altas (19). Gran parte de la oxidación catalítica del anhídrido sulfuroso tiene lugar en disolución dentro de las gotas de agua, interviniendo el oxígeno molecular como agente oxidante y las sales de hierro o de manganeso como catalizadores. Este proceso lo inicia el  $\text{SO}_3$ , y no el  $\text{SO}_2$ , por razones de higroscopicidad. Finalmente, se obtiene una niebla de pequeñas gotas de ácido sulfúrico que aumentan de tamaño a medida que chocan con gotas de agua. Las ecuaciones que representan

$$\begin{array}{l} 2 \text{SO}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SO}_3 \xrightarrow{(2 \text{H}_2\text{O}, \text{Fe}, \text{Mn})} 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \\ 2 \text{SO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \xrightarrow{(\text{sales Fe, Mn})} 2 \text{H}_2\text{SO}_4 \end{array}$$

En Santiago, las concentraciones de anhídrido sulfuroso se determinan en forma semicontinua desde 1978, mediante el método colorimétrico, usando la pararosanilina y, desde 1988, en forma continua, mediante la fluorescencia pulsante de luz ultravioleta.

Las concentraciones promedio anual, cuantificadas desde 1978 en las estaciones de la red de vigilancia (11), nunca han superado la norma de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , establecida por Resoluciones del Ministerio de Salud (1215 del 22/06/78 y 369 del 12/04/88). Los valores determinados con el registro más largo, en las siete estaciones, se presentan en la Figura N° 5.6. Allí se evidencia que los valores son muy variables entre un año y el siguiente, y no presentan ninguna tendencia definida. La antigüedad y calidad del instrumental y su sistema de calibración puede influir en los resultados puntuales obtenidos, no obstante estas dificultades, la información resulta suficientemente satisfactoria para visualizar tendencias de largo plazo.

El perfil semanal promedio del  $\text{SO}_2$  para las estaciones A y D de la red MACAM para el año 1992, se muestran en la Figura N° 5.8. Se aprecia una clara tendencia a la disminución a lo largo de la semana, mucho más definida en la estación D. Puesto que las emisiones no disminuyen a lo largo de la semana, parece razonable pensar que esta situación debe estar vinculada al consumo de  $\text{SO}_2$  por transformación a ácido sulfúrico y sulfatos, los cuales a su vez contribuyen al aumento del material particulado fino. La variabilidad diaria es muy alta (Figura N° 5.9), particularmente en los meses de invierno, como se aprecia en los resultados entregados por las estaciones

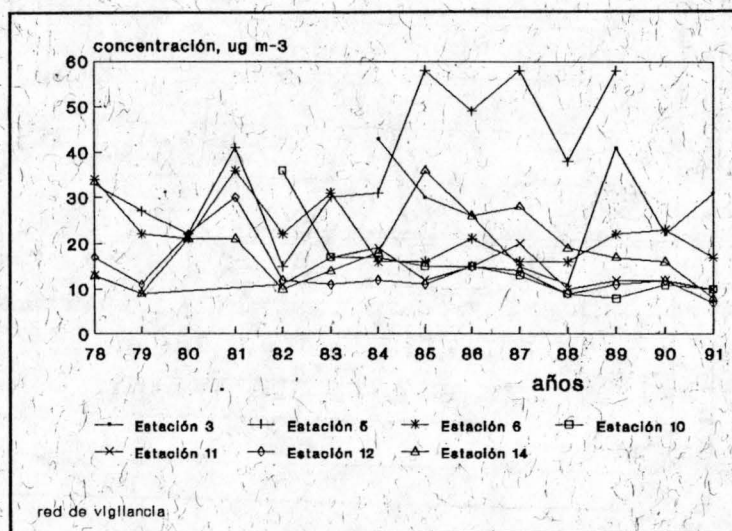


Figura N° 5.6: Concentraciones anuales promedio de dióxido de azufre, para diferentes estaciones de monitoreo de la red de vigilancia, a partir de 1978.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: M.M. Préndez.

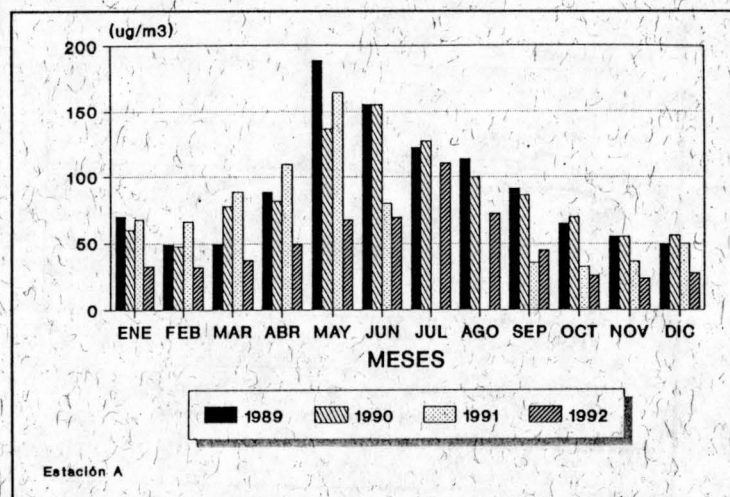


Figura N° 5.7: Concentraciones mensuales promedio de dióxido de azufre, entre 1989 y 1992, para las estaciones de monitoreo A (Figura N° 5.7a) y D (Figura N° 5.7b) de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

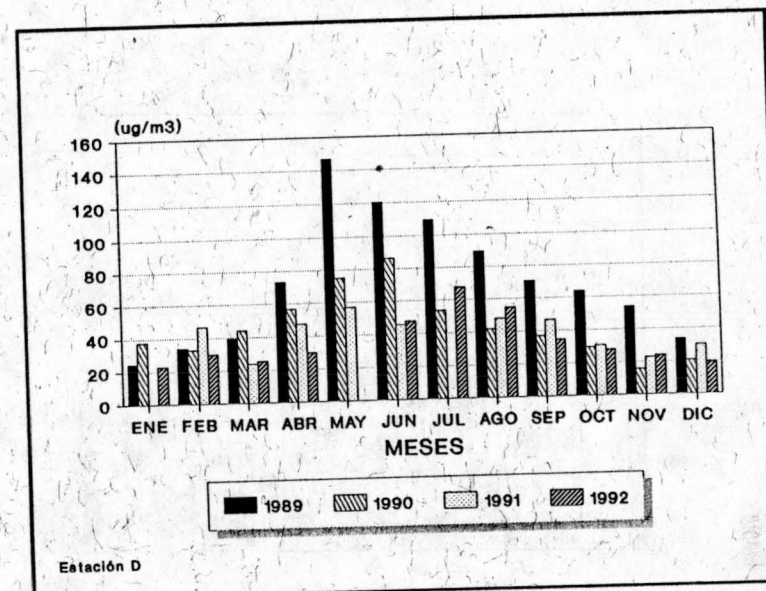


Figura N° 5.7 b.

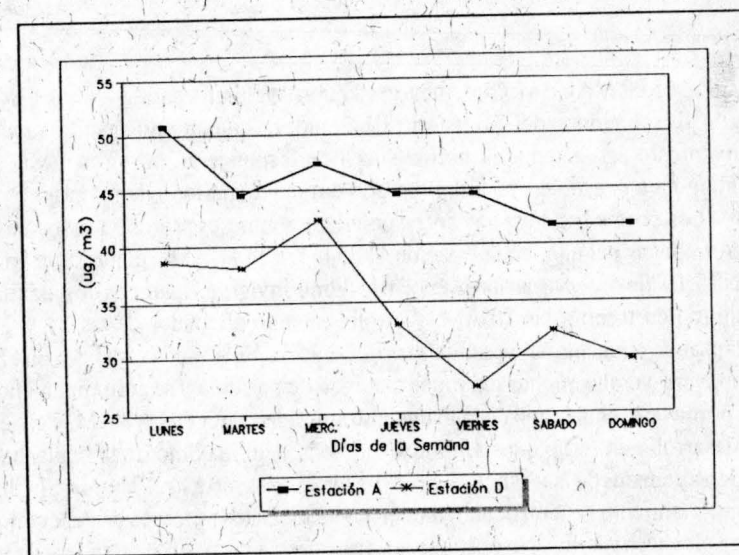


Figura N° 5.8: Perfil semanal de concentraciones diarias promedio de dióxido de azufre, durante 1992, para las estaciones de monitoreo A y D de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



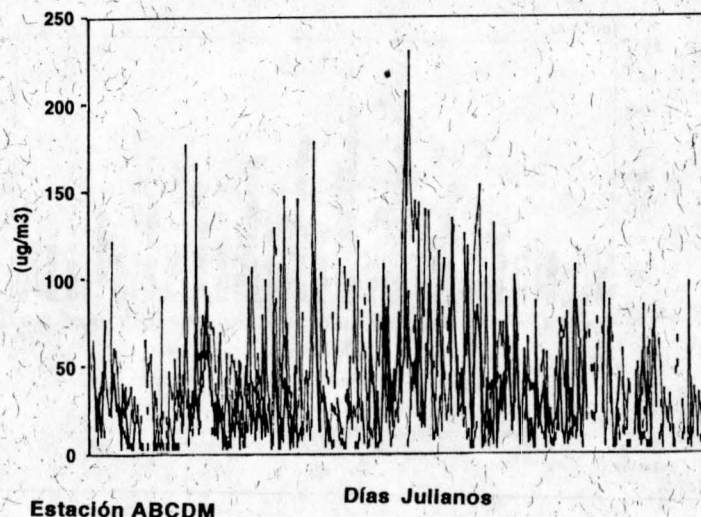


Figura N° 5.9: Concentraciones diarias de dióxido de azufre, durante 1992, para las diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

nes de la Red MACAM. Sin embargo, la norma chilena para 24 horas ( $365 \text{ ug m}^{-3}$ , según Resoluciones del Ministerio de Salud ya citadas) no resulta superada. Es conveniente agregar que la norma sueca corresponde a  $200 \text{ ug m}^{-3}$ , valor que en Santiago, en ocasiones, resulta superado durante el período de invierno.]

Los promedios horarios correspondientes a meses representativos de las diferentes épocas del año, en la estación D de la red MACAM, se muestran en la Figura N° 5.10. Se observa que en la época de otoño-invierno, aparecen dos máximos, uno centrado en torno a las 10 AM, y el otro situado alrededor de las 21 y 22 horas, alcanzando concentraciones máximas de 32 y 25 ppb, respectivamente. En el período primavera-verano, dichos máximos cambian de posición y se aproximan uno al otro. En primavera, el máximo de la mañana se sitúa alrededor de las 8 AM, y el de la tarde se desarrolla en torno a las 15 horas. En verano, el máximo de la mañana se ubica recién alrededor de las 12 horas, y el de la tarde, en torno a las 17 horas. Sin duda, este comportamiento general debiera poderse vincular a los procesos de generación de los aerosoles secundarios. No obstante, una respuesta más concreta requiere de información aún no disponible para Santiago y de un alto grado de confiabilidad de los datos. La importancia del anhídrido sulfuroso, en especial para los grupos más sensibles de la población (asmáticos, ancianos, niños), se deriva del hecho de que el tiempo de respuesta para observar efectos sobre los seres humanos es muy corto. En Santiago,

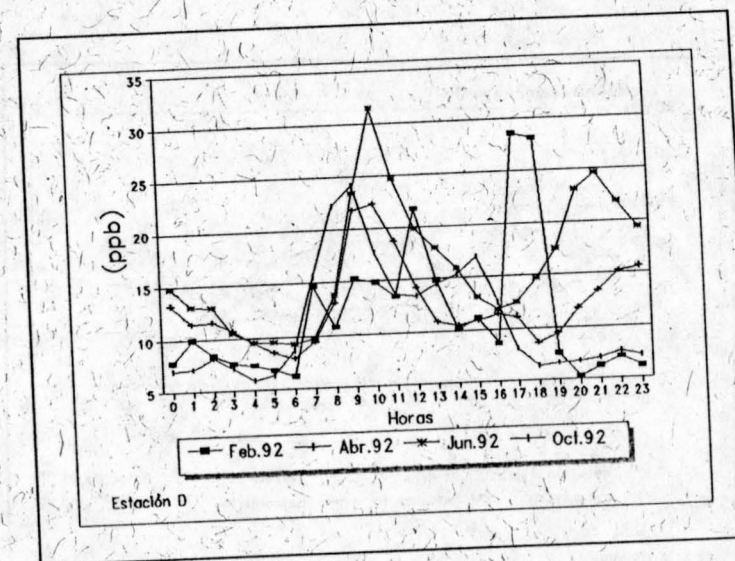


Figura N° 5.10: Concentraciones horarias promedio de dióxido de azufre, para meses representativos de las distintas épocas del año 1992, en la estación D de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

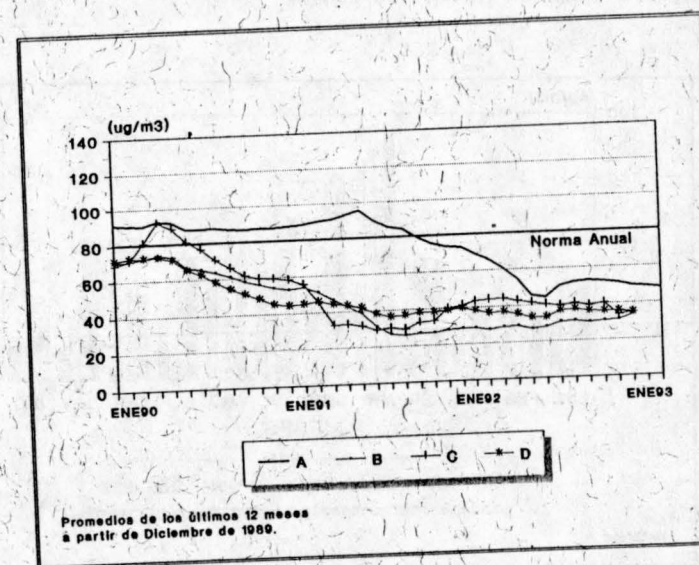


Figura N° 5.11: Concentraciones mensuales móviles promedio de dióxido de azufre para diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

algunas determinaciones (20), demuestran que, por ejemplo, la norma sueca de  $200 \mu\text{m}^{-3}$ , se sobrepasa frecuente y diariamente durante la época de invierno. Los promedios móviles determinados desde la red MACAM, considerados desde diciembre de 1989 (Figura N° 5.11), muestran una clara tendencia de disminución de las concentraciones en todas las estaciones de monitoreo. Esta tendencia no alcanza a reflejarse en la información que provee la red de vigilancia (Figura N° 5.6), pues ella sólo considera la información hasta el año 1991.

La tendencia planteada es especialmente evidente en la estación A, en la cual, a partir de enero de 1991, hay un ligero aumento de las concentraciones, el que culmina en el mes de mayo, seguido de un neto y brusco descenso de ellas. A partir de septiembre, las concentraciones se sitúan por debajo de la norma anual. En junio de 1992, se observa un pequeño aumento en los valores. Esta estación, la más afectada por la presencia de la locomoción colectiva, muestra las concentraciones más altas.

Las estaciones B y D se encuentran permanentemente bajo la norma anual. En la estación C, se observa un brusco pero corto período de aumento de las concentraciones a comienzos del año 1990, llegando incluso a superar momentáneamente la norma anual, seguido de una disminución monotónica hasta marzo de 1991. Estas variaciones se han asociado a un problema de calidad de los datos (21).

La disminución general observada podría deberse a disminuciones reales de algunas emisiones industriales, o a una baja en el porcentaje de azufre en el combustible.

[Adicionalmente, hay estudios (22) que muestran que en el sector céntrico, la presencia de  $\text{SO}_2$  está influenciada más directamente por las calderas de calefacción que por el transporte vehicular. En la zona residencial de nivel socioeconómico más alto, se observa además la influencia de la combustión de leña. En el sector industrial de la ciudad, el  $\text{SO}_2$  es producido en más de un 90% por las fundiciones, calderas y hornos que emplean petróleo residual y carbón como combustible.]

### LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO ( $\text{NO}_x$ )

[Casi todos los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) antropogénicos se producen por la oxidación del nitrógeno atmosférico presente en las combustiones abiertas a altas temperaturas. El óxido inicial es el NO, que rápidamente se oxida a  $\text{NO}_2$ . Ambos óxidos liberados en la atmósfera entran en un conjunto natural de reacciones fotoquímicas, denominadas el ciclo fotocíclico del  $\text{NO}_2$ , que conducen a un aumento de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  y a una disminución de las concentraciones de NO.]

[El  $\text{NO}_2$  es clave para la formación de otra cadena de reacciones químicas que siguen hacia la formación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), de nitratos y de los oxidantes fotoquímicos.]

[El smog fotoquímico urbano tiene su origen, básicamente, en las emisiones de los automóviles, pues corresponde a una mezcla compleja de productos que se forma

a partir de la interacción de la luz solar con dos de los componentes principales de los gases de escape, el NO y los hidrocarburos.] Además, pueden participar otros elementos contaminantes presentes en la atmósfera, tales como el anhídrido sulfuroso y las partículas, e influir las condiciones meteorológicas que impiden la dispersión de los contaminantes.

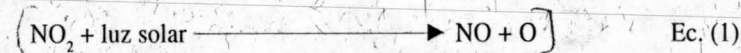
[El oxidante formado que predomina es el ozono, con cantidades variables de otros compuestos oxidantes, entre los cuales se encuentra el nitrato de peroxiacetilo, llamado normalmente PAN.] Estos componentes menores contribuyen a la diferencia entre los efectos observados en distintos lugares para la misma concentración total de oxidantes (14, 20).

No obstante lo anterior, la medición de la concentración de ozono es aún la mejor medida disponible de la severidad de formación del smog fotoquímico.

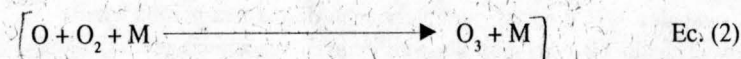
La máxima concentración factible de oxidante para un día en particular, es una función compleja de las concentraciones de hidrocarburo y óxido de nitrógeno.

A pesar de estas complejidades, la cronología de formación del smog fotoquímico es muy similar en diferentes ciudades del mundo.

[La reacción inicial en la formación del smog es la interacción de la luz solar con el dióxido de nitrógeno, para producir óxido nítrico y oxígeno atómico, según la ecuación:]



[El oxígeno atómico reacciona con una molécula de oxígeno en presencia de un catalizador (M), dando origen a una molécula de ozono ( $\text{O}_3$ ), en la forma:]



[En ausencia de otra especie reactiva, el ozono reacciona con NO y completa el ciclo que regenera el  $\text{NO}_2$ , liberando una molécula de oxígeno.]

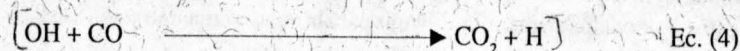


Sin embargo, en presencia de hidrocarburos, se hace posible una serie de otras reacciones con oxígeno atómico y ozono, con lo cual se interfiere el ciclo antes indicado. La reactividad frente al oxígeno atómico y al ozono, para algunos compuestos orgánicos, corresponde, en orden decreciente, a alquenos, aldehídos, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos alifáticos saturados. Bajo ciertas circunstancias, por ejemplo en períodos de irradiación más largos que un día, como puede ocurrir en condiciones de estancamiento climático, los hidrocarburos alifáticos saturados, muy poco reactivos, pueden producir un nivel de oxidantes totales tan elevado como los correspondientes hidrocarburos insaturados.

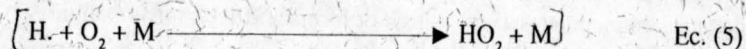
Con la intervención de los diferentes hidrocarburos, los procesos de forma-



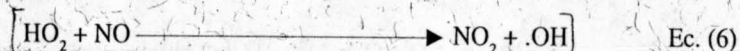
ción del smog siguen varias rutas, las cuales, en general, implican la formación de peróxidos que mantienen baja la concentración de NO y habilitan la formación del oxidante. Estas reacciones no son capaces de explicar la tasa inicial de conversión de NO a NO<sub>2</sub>, y para hacerlo es preciso introducir una tercera especie oxidante, el radical hidroxilo (.OH). El radical .OH es capaz de convertir el NO en NO<sub>2</sub>, mediante un mecanismo en el cual interviene el monóxido de carbono (CO), de acuerdo a la ecuación: ]



[El átomo de hidrógeno (H.), reacciona con una molécula de oxígeno en presencia de un catalizador (M), para formar un nuevo radical, de acuerdo a la ecuación: ]

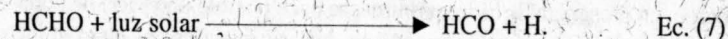


[que es capaz de convertir NO en NO<sub>2</sub> y regenerar el radical .OH, de acuerdo a la reacción: ]

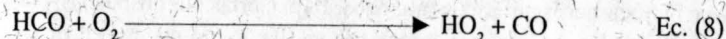


[El radical .OH es una especie oxidante de gran importancia en el proceso de smog fotoquímico. ]

En la atmósfera, además de las reacciones fotoquímicas anteriores, en las que participan los radicales .OH y en las que intervienen de manera preponderante el formaldehído y el ácido nitroso [normalmente ocurren reacciones naturales que toman en consideración la participación del metano y que conducen a la formación de formaldehído y a la conversión de NO en NO<sub>2</sub>, sin pérdida de oxidante. De este modo, el formadehído no es solamente un producto del smog fotoquímico, sino que se produce como resultado de un proceso natural y por lo tanto está siempre presente en la atmósfera. La ecuación correspondiente al proceso es: ]



seguida por:

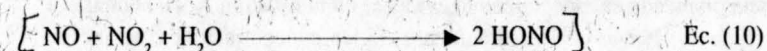


y luego por:

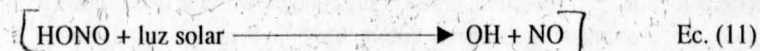


[El resultado neto de todo el proceso, vía la reacción mostrada en la ecuación (6), es la conversión de dos moléculas de NO y la producción de dos radicales .OH por cada molécula de formaldehído destruida. ]

[La reacción de ácido nitroso, HONO, para producir OH, es hipotética, porque la presencia de este ácido en la atmósfera no se ha demostrado nunca, aunque sí se ha detectado mediante experimentos de laboratorio en cámaras de simulación y se ha medido la constante de equilibrio para la reacción: ]



[Este compuesto se descompone con la luz solar y forma el radical hidroxilo y NO. ]



La oxidación de hidrocarburos causada por el radical OH ocurre a una velocidad mayor que la oxidación de O<sub>3</sub>/O acompañante, ya sea por extracción de átomos de hidrógeno, ya sea por adición al doble enlace.

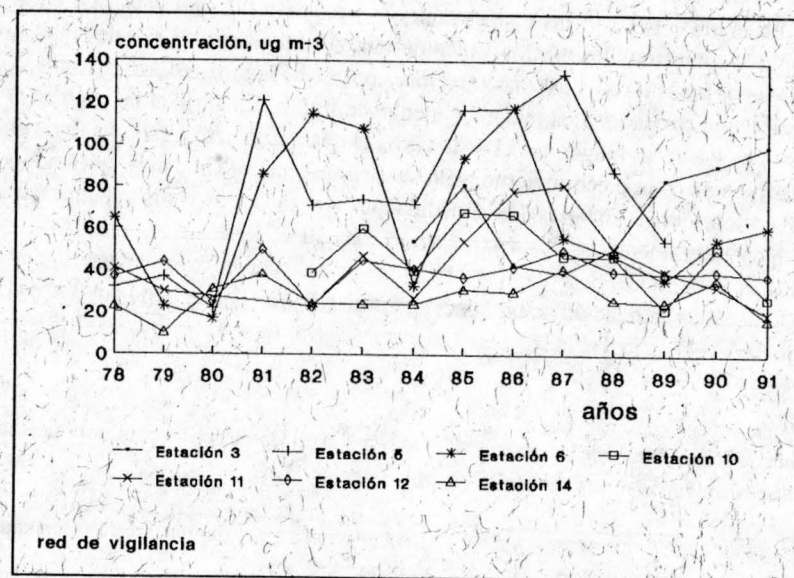
[La formación de smog y la integración de oxidante se detienen finalmente como consecuencia del inicio de la pérdida de la luz solar al anochecer y, si es el caso, por la dispersión de reactivos y productos de las reacciones. ]

En Santiago existe información sobre este contaminante desde 1978, para determinaciones efectuadas de manera semiautomática mediante el método colorimétrico usando arsenito de sodio, y desde 1988, en forma automática, mediante el método basado en la quimioluminiscencia del ozono, cuantificando separadamente NO y NO<sub>2</sub>.

Las concentraciones promedio anuales entregadas por la red de vigilancia, para aquellas estaciones con mayor cantidad de información (11), se muestran en la Figura N° 5.12, en la cual no se evidencia ninguna tendencia definida para los últimos 14 años.

Respecto a las concentraciones promedio mensuales de NO<sub>2</sub> observadas mediante la red MACAM, no hay un patrón definido; no se observa un ciclo anual y tampoco existe un período definido de concentraciones mayores y menores. En los años 1989 y 1990, las menores concentraciones se observaron en invierno; en cambio, en los años 1991 y 1992, los mayores valores ocurrieron precisamente durante el invierno (23).

En cuanto a los valores absolutos, los promedios anuales para todas las estaciones, durante los últimos cinco años, se sitúan sobre los 50 ug m<sup>-3</sup>, alcanzando hasta 220 ug m<sup>-3</sup>, y superándose la norma de 100 ug m<sup>-3</sup> (Resoluciones del Ministerio de Salud ya citadas) en algunos años y estaciones. Los valores diarios y mensuales de las concentraciones absolutas cambian de un año al siguiente. Esta variación en el tiempo es diferente para las distintas estaciones, aunque en algunas ocasiones y, con duración de unos pocos días, dicha variación resulta similar (23).

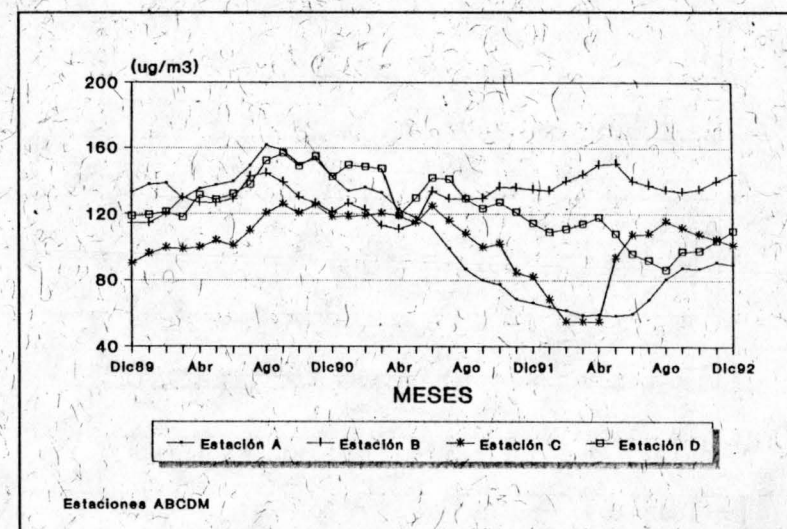


**Figura N° 5.12:** Concentraciones anuales promedio de dióxido de nitrógeno, para diferentes estaciones de monitoreo de la red de vigilancia, a partir de 1978.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: M.M. Préndez.

El estudio de promedios móviles de los últimos cuatro años, para las concentraciones mensuales promedio de las estaciones A, B, C y D de la red MACAM, no muestra una tendencia general claramente definida (Figura N° 5.13). La variación de las concentraciones depende de la estación y de los años considerados. En el primer año, hay una tendencia al incremento de los valores hacia los meses de invierno y, posteriormente, una disminución que va de la primavera al otoño del año siguiente, prácticamente de la misma forma para todas las estaciones. A partir del otoño de 1990, se observa un sistemático incremento (115 a 150  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para la estación B, una disminución en el caso de la estación D, y una marcada disminución durante todo un año para las estaciones A y C, que se transforma en un notorio incremento a partir del otoño de 1992.

Un estudio efectuado en 1989 (12), mostró que en verano, en las concentraciones promedio en las estaciones A, B, C, y D, existe diferencia entre NO y NO<sub>2</sub>, siendo, en general, los primeros superiores a los segundos y con concentraciones diurnas mayores que las nocturnas. En la estación M, en cambio, las concentraciones de NO<sub>2</sub> son casi dos veces mayores que las de NO y no se observan diferencias entre el día y la noche.



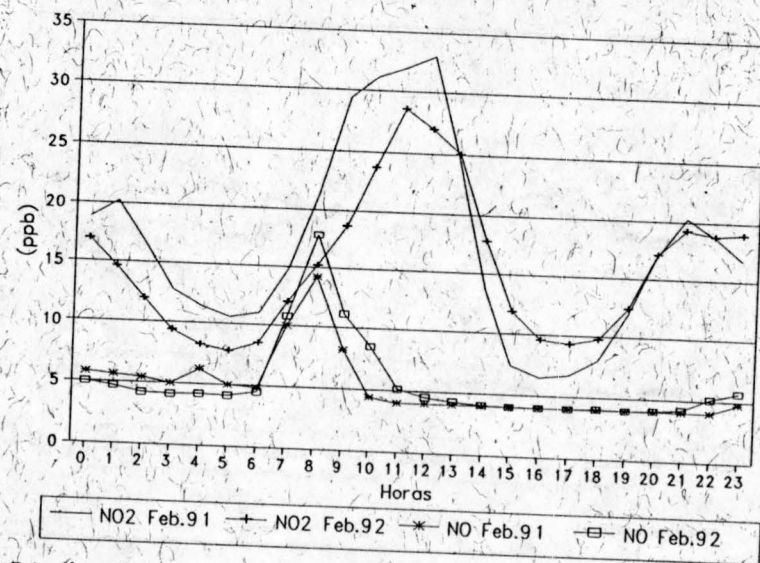
**Figura N° 5.13:** Concentraciones mensuales móviles promedio de dióxido de nitrógeno, para diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

La variación de las concentraciones de NO y NO<sub>2</sub> a lo largo del día en la estación M, durante los veranos de 1991 y 1992, ejemplificados en el mes de febrero, se muestra en la Figura N° 5.14, confirmando las conclusiones obtenidas anteriormente. Se ve que en la mañana, a partir de las 6 AM, aproximadamente, existe un incremento inicial de las concentraciones de NO (con un máximo a las 8 AM, aproximadamente), seguido prontamente del aumento de las concentraciones de NO<sub>2</sub>, estando los valores extremos desfasados en unas 4 horas. En la tarde, las concentraciones de NO se mantienen bajas, aumentando ligeramente sólo en las primeras horas de la noche. En cambio, las concentraciones de NO<sub>2</sub>, después de mostrar el mínimo en torno a las 16 y 17 horas, aumentan dando un nuevo máximo alrededor de las 21 horas. Los valores máximos se sitúan en torno a 16-17 ppb (partes por mil millones) para NO y alrededor de 20 ppb para NO<sub>2</sub>.

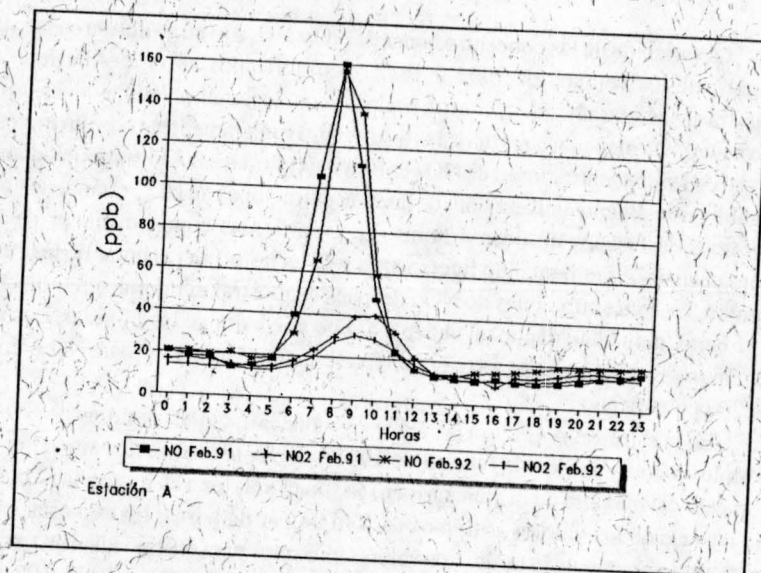
En la estación A (Figura N° 5.15), las concentraciones horarias de NO y NO<sub>2</sub>, para los mismos meses de febrero de 1991 y 1992, muestran una situación similar respecto del máximo de la mañana, pero se sitúan más bien en torno a las 7 horas, con un desfase de los valores extremos de sólo un par de horas. En esta estación no se aprecia el máximo de la tarde. Los valores extremos para NO se sitúan en torno a 160 ppb (10 veces el valor encontrado en la estación M) y en torno a 30 +/- 10 ppb (muy similar a la estación M) para el NO<sub>2</sub>.





Estación M

**Figura N° 5.14:** Concentraciones horarias promedio de monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, para la estación M de la red MACAM, en febrero de 1991 y 1992.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



Estación A

**Figura N° 5.15:** Concentraciones horarias promedio de monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, para la estación A de la red MACAM, en febrero de 1991 y 1992.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

En el resto del año las concentraciones promedio horarias para NO, en la estación M, muestran dos máximos bien definidos, el de las 8 AM y el de la tarde, alrededor de las 21 horas. Las concentraciones promedio horarias de NO<sub>2</sub>, en cambio, muestran una curva con dos máximos menos definidos. En abril, el máximo de la mañana es 1,4 veces mayor que el de la tarde, el que por lo demás está avanzado en un par de horas. En pleno invierno, sólo se distingue un máximo muy extendido y desplazado hacia las 16 horas. En la medida que avanza la primavera, se empiezan a distinguir nuevamente los dos máximos hacia las 10 y 21 horas.

Las variaciones descritas para la estación M, pueden representarse durante 1992, mediante la relación de las concentraciones NO/NO<sub>2</sub>, a lo largo del día, en la forma indicada en la Tabla N° 5.2:

**Tabla N° 5.2:** Relación de las concentraciones NO/NO<sub>2</sub> a lo largo del día, para los promedios horarios de algunos meses del año 1992, en la estación M.

Hora	Febrero	Abril	Junio	Octubre
		NO/NO <sub>2</sub>		
8 AM	1,2	2,1	3,4	1,1
10 AM	0,41	0,35	1,3	0,24
12 AM	0,16	0,13	0,40	0,11
16 PM	0,42	0,22	0,36	0,19
18 PM	0,40	0,30	1,1	0,20
21 PM	0,24	1,5	1,5	1,1

Los resultados podrían explicarse considerando diversos factores: por una parte, el aire que alcanza el área oriente de la ciudad, durante el día, corresponde a "aire viejo"; viejo en el sentido de que las fuentes de emisiones primarias se encuentran en la dirección de donde provienen los vientos. Esto se sustenta en el hecho de que la presencia de NO es bastante mayor en las estaciones del centro que en las de la periferia, lo cual es nuevamente concordante con el hecho de que el NO es el contaminante primario emitido por los vehículos motorizados. Pero, por otra parte, se deben considerar las emisiones propias del área oriente, a las horas de mayor flujo vehicular (en la mañana y al anochecer), así como la dependencia de la presencia de luz solar en la transformación NO/NO<sub>2</sub>, lo que explica las relaciones superiores a 1. Por último, se debe tomar en cuenta la disminución del flujo vehicular durante el período de verano y el aumento de la velocidad del viento en primavera y verano.

## EL OZONO

Como se planteó anteriormente, este gas es un contaminante secundario generado en el proceso de formación del smog fotoquímico. En Santiago, la determinación de las concentraciones de este contaminante se inicia con la puesta en operaciones de la red MACAM. El método utilizado se basa en la reacción de quimioluminiscencia con etileno, para las estaciones A, B, C y D, y de absorción de luz ultravioleta para la estación M. No obstante, por diversas razones técnicas, fundamentalmente problemas de calibración, falta información confiable para los años 1989, 1990 y 1991; en cambio, hay buena información para 1992, aunque bastante incompleta.

Los promedios mensuales por estación, incluyendo febrero de 1993, que se entregan en la Figura N° 5.16, muestran que los mayores valores se dan en la estación M, seguida, en orden decreciente, de las estaciones C, A, D y B. Esta última con valores que son un 50% o más, inferiores a los correspondientes de la estación M.

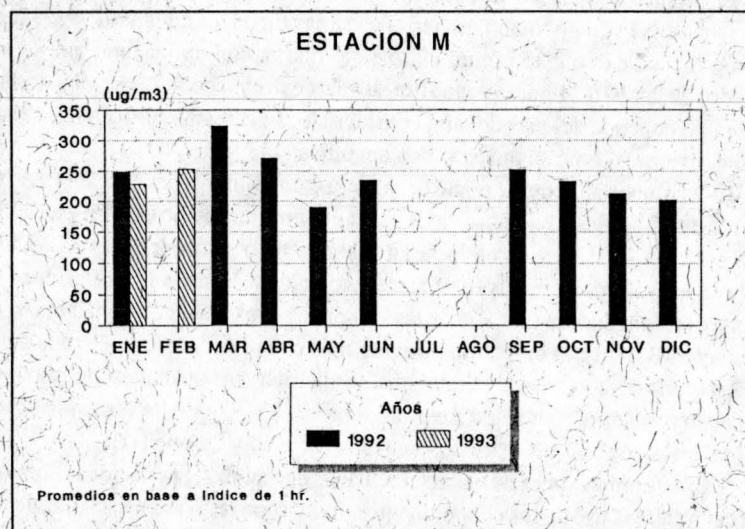
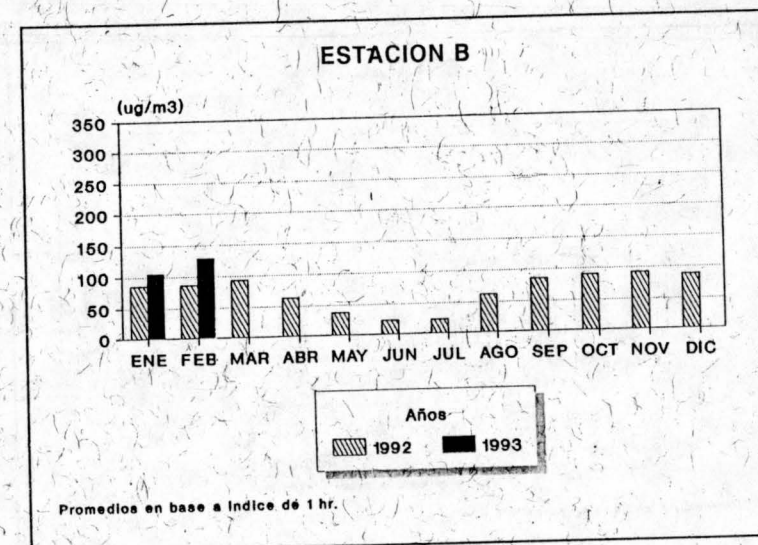
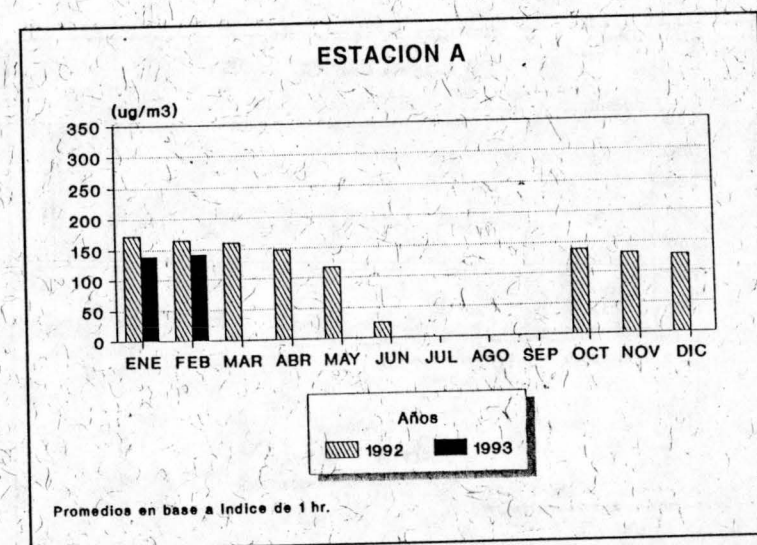
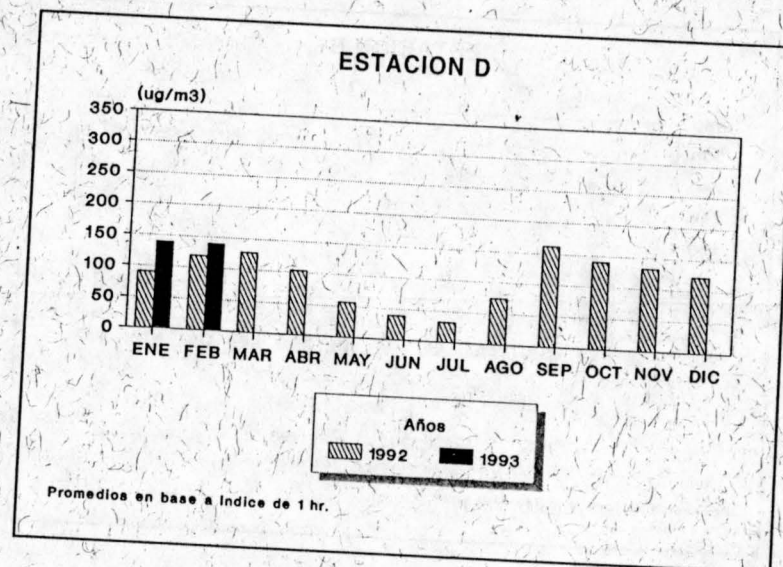
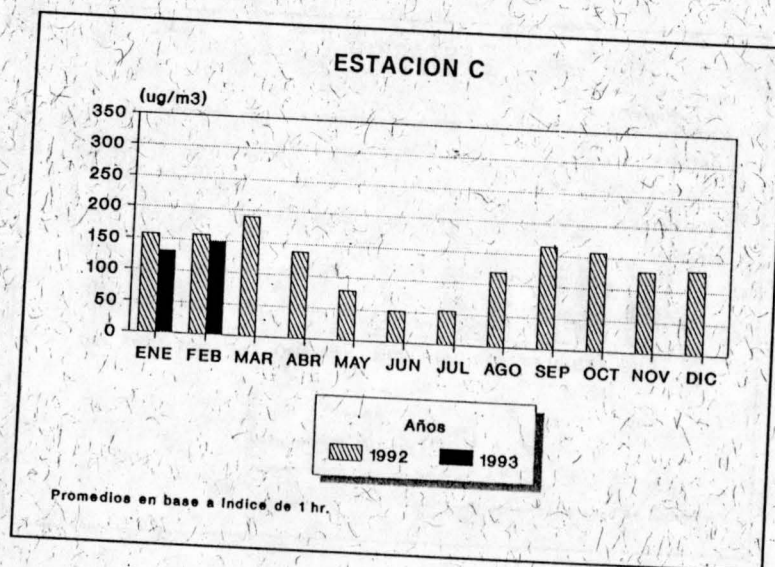


Figura N° 5.16: Concentraciones mensuales promedio de ozono para las cinco estaciones de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.







Las estaciones C, D y B, exhiben un claro ciclo anual con una neta disminución de las concentraciones en el período de invierno, lo cual resulta razonable para un contaminante de origen básicamente fotoquímico. En las estaciones M y A, la falta de información impide asegurar que se cumpla este mismo ciclo anual.

Respecto de los valores absolutos, los promedios mensuales de verano (diciembre-marzo), para todas las estaciones, excepto la M, se sitúan entre 90 y 160 ug/m<sup>3</sup>; en invierno (mayo-agosto), los valores varían entre 20 y 110 ug/m<sup>3</sup>. En primavera (septiembre-noviembre), los valores son algo menores que los de verano y muy superiores a los de invierno.

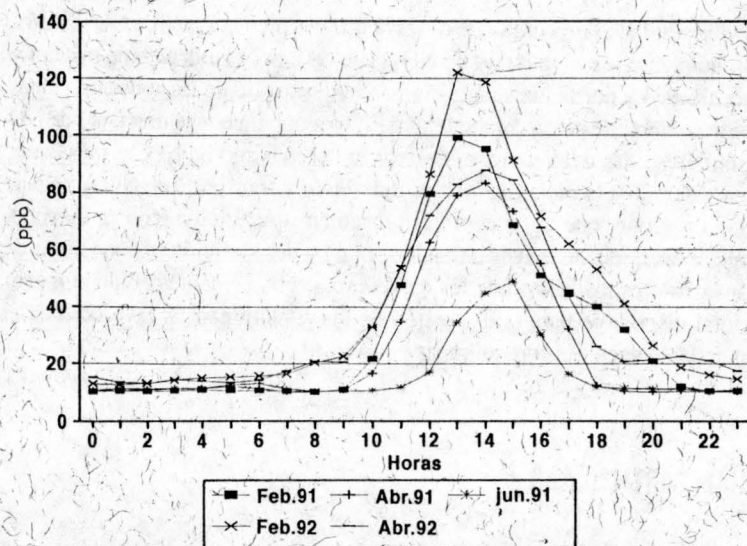
En el caso de la estación M, las concentraciones de verano superan los 300 ug/m<sup>3</sup>, y los valores correspondientes a mayo y junio, no disminuyen notablemente. Asimismo, las concentraciones en primavera son elevadas, alcanzando los 250 ug/m<sup>3</sup>. En consecuencia, la norma de 235 ug m<sup>-3</sup> para períodos de 1 hora (Resoluciones del Ministerio de Salud 1215 del 22/6/78 y 369 del 12/4/88), se ve frecuentemente superada en verano y, en ocasiones, también en primavera.

El promedio mensual horario para meses representativos de las tendencias observadas en el verano, otoño, invierno y primavera de los años 1991 y 1992, en la estación M, indican que existe un claro ciclo diario, con un máximo que se inicia alrededor de las 10 u 11 horas y muestra su valor extremo entre las 12 y las 15 horas. Su término depende del mes del año considerado, siendo más corto en los meses de otoño e invierno, como se muestra típicamente en la Figura N° 5.17.

Este comportamiento se repite de manera muy similar en las estaciones A (valor extremo de 55 ppb en noviembre) y C (valor extremo de 90 ppb en julio y en agosto). En la estación D, si bien se observa un máximo (con un valor extremo de 50 ppb octubre), los valores disminuyen de manera muy lenta después de alcanzado el valor extremo, prolongándose más allá de las 20 horas, en los meses de primavera-verano. La estación B, muestra un patrón bastante más complicado, altamente dependiente del mes considerado y con valores que se distribuyen mostrando un máximo en primavera e invierno, con valores extremos entre 20 y 30 ppb. En verano se observan dos máximos con valores extremos situados entre 10 y 20 ppb (12).

Las determinaciones de ozono efectuadas en Kalinka, la estación utilizada para conocer valores base de los contaminantes, indica que las concentraciones de ozono tienden a ser más elevadas entre las 12 y las 16 horas, y en la época de primavera. En este período, los valores alcanzan cifras situadas entre 20 y 30 ppb. En las épocas de verano e invierno, las concentraciones de ozono, en general, no superan las 10 ppb. Los valores mínimos corresponden al mes de julio.

Sin duda que el comportamiento observado en el ozono, está determinado por los factores que influyen en la generación de este contaminante, sus precursores y la luz solar.



Estación M

Figura N° 5.17: Concentraciones horarias promedio de ozono, para la estación M de la red MACAM, en diferentes épocas de 1991 y 1992.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

## LOS HIDROCARBUROS (HC)

Los hidrocarburos urbanos provienen principalmente de la combustión del carbón, de la leña y del petróleo y sus derivados. Los procesos de evaporación son también importantes. Los vehículos motorizados constituyen por lo tanto, una importante fuente de estos compuestos orgánicos.]

[Incluso a nivel mundial la información que se tiene sobre estos contaminantes es insuficiente, principalmente debido a que las emisiones provenientes, tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles, han sido incorrectamente cuantificadas, en especial en lo relativo a la combustión a nivel domiciliario (20).]

En Santiago, los hidrocarburos se monitorean, desde la instalación de la red MACAM, mediante el uso de un detector de ionización de llama, que consiste en una llama de aire/hidrógeno a través de la cual se provoca una descarga eléctrica. Cuando los HC se pirolizan, su conductividad aumenta, siendo la corriente proporcional al número de átomos de carbono del HC. En la estación M, se monitorean separadamen-

te los HC totales (HCT) y el metano. Este método de análisis requiere, y es muy dependiente, de su exacta y permanente calibración, condiciones no siempre fáciles de satisfacer.

Normalmente, los métodos comerciales permiten la medición separada del metano ( $\text{CH}_4$ ), el CO y los HCT. La determinación de mayor interés corresponde a los HCT, excluido el metano, valor que puede obtenerse por diferencia.

En la Figura N° 5.18a, se muestran los promedios mensuales de los HCT durante 1992, en las estaciones B y M de la red MACAM. Los valores absolutos de las concentraciones son, en esta última, bastante menores a los de la estación B (Providencia), la cual está más influenciada por la locomoción colectiva. Puede observarse también que, en la estación B, existe un cierto aumento de las concentraciones durante el período invernal.

En la Figura N° 5.18b, se presentan los promedios horarios para los HCT en la estación M, para meses representativos de las diferentes épocas del año 1992. Se observa que no existe una curva patrón, siendo cada estación diferente de la otra, aunque se aprecia una cierta tendencia al aumento de las concentraciones en la medida que avanza el día y a una disminución progresiva a partir de las 22 horas, estando el valor mínimo alrededor de las 5 AM.

Los valores absolutos son un poco más altos en invierno y, alrededor de las 8 AM, se observa un pequeño máximo y otro bastante desarrollado hacia las 17 horas, alcanzando valores del orden de 3 ppm. En verano, el máximo de la mañana (8 AM) es muy pequeño, pero se presenta un máximo bien desarrollado hacia las 13 y 14 horas, alcanzando las 2,7 ppm, aproximadamente. En primavera y otoño, se observan tres máximos: uno muy pequeño en la mañana (8 AM), otro más alto y extendido, con su máximo valor cerca de las 13 horas (2,2 - 2,4), y un tercero, similar a éste, con su máximo valor alrededor de las 20 y 21 horas.

[Este comportamiento confirma el hecho usualmente citado en la literatura especializada, que las emisiones de los HCT son originadas básicamente por las emisiones de los vehículos motorizados. Por otra parte, su consumo en la atmósfera es lento y se relaciona con las horas de luz solar.]

Las determinaciones efectuadas en Santiago, durante 1991 (20), entregan cierta información respecto de algunos hidrocarburos ligeros, tales como etano, eteno, propano, propeno, butano y buteno, formaldehído y los hidrocarburos aromáticos benceno y tolueno. Los resultados muestran que los valores de las concentraciones para el tolueno y el formaldehído, disminuyen hacia la primavera, mientras que las concentraciones de benceno aumentan. Esta situación es explicada (20) por la disminución de las emisiones de estos contaminantes, unida a los cambios meteorológicos. Una alternativa podría tener relación con la diferente reactividad fotoquímica de los compuestos. Los perfiles semanales de estos contaminantes muestran su origen desde diferentes fuentes, en especial el tolueno (20).

En la Figura N° 5.19, se muestra la variación de las concentraciones de diferentes gases a lo largo de días típicos de verano (Figura N° 5.19a) y otoño (Figura



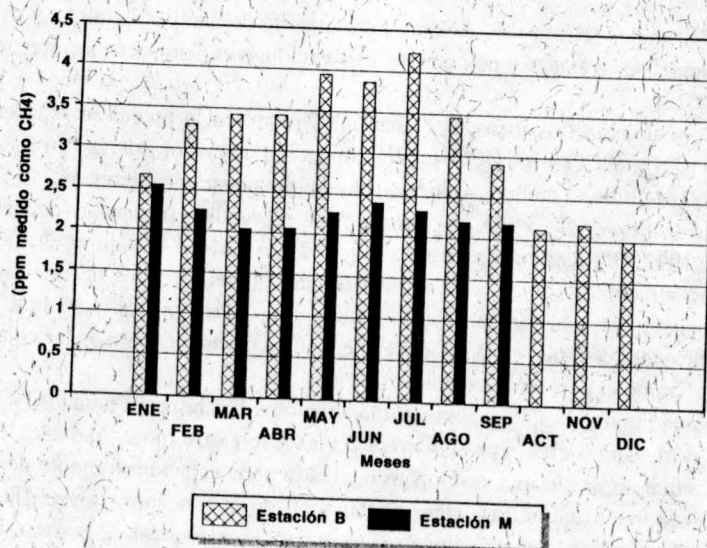


Figura N° 5.18 a: Concentraciones mensuales promedio de hidrocarburos totales, para la estación B y M de la red MACAM, durante 1992.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

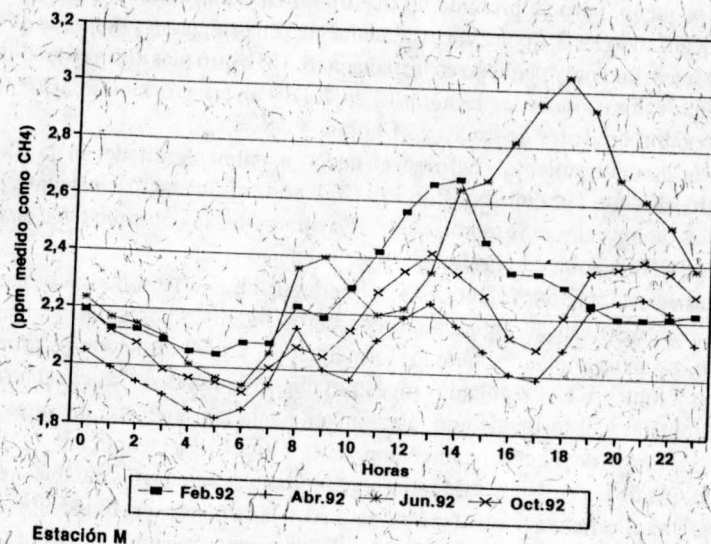


Figura N° 5.18 b: Concentraciones horarias promedio de hidrocarburos totales, para la estación M de la red MACAM, en diferentes épocas de 1992.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

N° 5.19b), durante 1992. En verano, se observa que el típico máximo de NO (8 AM), seguido prontamente por el máximo de NO<sub>2</sub> (10 AM), por el aumento de metano y otros hidrocarburos y por la luz solar, originan el desarrollo de las concentraciones de ozono con su máximo cerca del mediodía. En otoño, para concentraciones de NO iniciales similares a las del verano, el desarrollo del máximo de NO<sub>2</sub> es más lento, posiblemente debido a la menor velocidad del viento y transporte de NO, y coincidente con el de ozono, que es mucho más brusco en su aparición (con su máximo, nuevamente, a las horas de mayor radiación solar) y desaparición (menos horas de luz). Alcanza valores más altos que los de verano, probablemente debido al menor volumen total disponible para la dispersión de los contaminantes, favoreciendo el desarrollo de las reacciones fotoquímicas.]



## MATERIAL PARTICULADO

[Se denomina material particulado, aerosoles atmosféricos o simplemente partículas, a las partículas y a las pequeñas gotas líquidas suspendidas en el aire. El rango de tamaño de dichos aerosoles es muy variado, abarcando desde los 0,001 micrómetros (µm), aerosoles microscópicos, hasta los 100 µm ó más, visibles, de variadas formas y composición química. La composición elemental incluye diferentes elementos, unos livianos como el aluminio, silicio, potasio, calcio y, otros pesados como el hierro, cinc, vanadio, titanio, plomo, además de compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y mutagénico.]

### ORIGEN Y PROPIEDADES

[El material particulado se origina desde fuentes naturales continentales como el polvo levantado por tormentas, erupciones volcánicas y otras, y desde el mar por la evaporación de gotitas de agua. El otro gran contribuyente a nivel urbano son las emisiones generadas por el hombre, llamadas fuentes antropogénicas.]

Los aerosoles antropogénicos están constituidos por:

- partículas sólidas (humos), formadas por la combustión, por ejemplo del petróleo, la leña o el carbón, ya sea desde fuentes fijas o móviles;
- partículas de diámetro menor a 0,2 µm, provenientes de la transformación gas-partícula y derivadas de reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) e hidrocarburos antropogénicos, que son básicamente las reacciones químicas generadoras del "smog" fotoquímico;
- otros aerosoles secundarios derivados de la transformación de gases en partículas, como los sulfatos, ya sea neutralizados o en forma de ácido sulfúrico, o la reacción de ozono con ciertas olefinas para formar productos condensables.

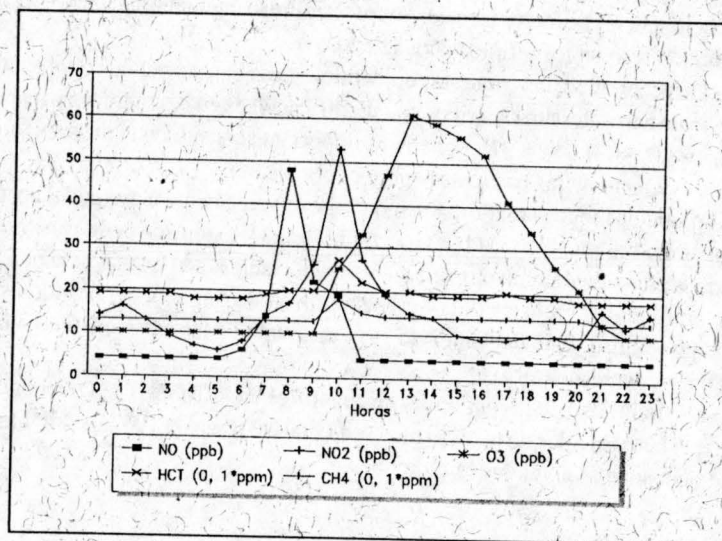


Figura N° 5.19 a: Concentraciones horarias de monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, ozono, hidrocarburos totales y metano, para un día tipo de febrero de 1992, en la estación M de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

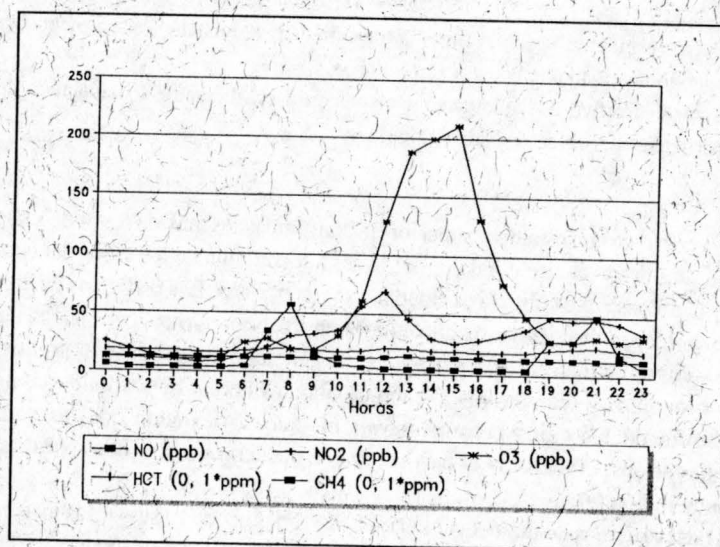


Figura N° 5.19 b: Concentraciones horarias de monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, ozono, hidrocarburos totales y metano, para un día tipo de abril de 1992, en la estación M de la red MACAM.

El proceso de conversión gas-partícula juega un papel muy importante en la contaminación del aire, tanto a nivel de fuentes emisoras como en las atmósferas urbanas. Se ha estimado que en la ciudad de Los Angeles, Estados Unidos (24), un 30% de la masa de aerosol se genera por este mecanismo. Este material contribuye considerablemente a la degradación de la visibilidad, puesto que tiende a acumularse en el rango de tamaño de 0,1 a 1,0  $\mu\text{m}$ , en el cual la dispersión de la luz es más eficiente.

Otro proceso importante que ocurre en el aerosol es la coagulación o solidificación de las pequeñas gotas, ya que se modifica la forma de la distribución de tamaños del aerosol, así como la distribución de la composición química con respecto al tamaño. En la práctica, la coagulación y la conversión gas-partícula ocurren con frecuencia simultáneamente.

[El tiempo de permanencia en el aire y las distancias que alcancen los aerosoles atmosféricos desde sus fuentes emisoras dependen en gran medida de su tamaño y densidad. Las partículas más pequeñas y livianas son capaces de viajar largas distancias y permanecer en el aire por períodos de tiempo que pueden alcanzar varias semanas (25, 26).]

[La importancia del papel que juegan los aerosoles atmosféricos, a nivel global, se refiere en esencia a que: (I) dispersan y absorben tanto la radiación solar como la terrestre y, por lo tanto, afectan el balance calórico de la tierra; (II) actúan como núcleos de condensación del vapor de agua y, debido a ello, son relevantes en la formación de las nubes —al respecto, su rol resulta particularmente notable en el proceso químico que ocurre a nivel de la estratósfera antártica y que actualmente se vincula a la disminución de la capa de ozono estratosférico (27)—; (III) pueden actuar como núcleos de congelación e influir sobre la precipitación de nieve y la formación de granizo.]

A nivel urbano, pueden además tener otros efectos que se detallan en la sección siguiente.

#### ALCANCES SOBRE LOS AEROSOL URBANOS

[La cantidad de aerosoles antropogénicos liberados a la atmósfera de una ciudad depende de su desarrollo industrial y urbano, de su orografía, de las condiciones meteorológicas y de las medidas que se hayan adoptado para controlar las emisiones innecesarias. La situación no es simple y el rol de los aerosoles atmosféricos requiere de un análisis detallado; por una parte, es necesario considerar los orígenes y fuentes específicas de dichos aerosoles (aerosoles primarios) y, por otra, deben conocerse sus transformaciones en la atmósfera (aerosoles secundarios). La formación y distribución de los compuestos secundarios depende, además, de los factores puramente químicos y de diferentes factores climáticos, tales como la irradiación solar, el viento, la temperatura, la humedad relativa, entre otros.]



La contaminación general de una ciudad y, en especial, su contaminación por partículas, puede deberse:

- a fuentes exógenas que proyecten aerosoles a grandes distancias;
- a procesos endógenos derivados de fuentes localizadas al interior de la ciudad (áreas industriales mal localizadas o deficientemente controladas y vehículos motorizados mal controlados);
- a condiciones topoclimáticas desfavorables a la dispersión de los contaminantes; y
- a una combinación o potenciación de todos los factores anteriores.

La contaminación de una ciudad también puede ser exportada hacia zonas rurales más o menos próximas, dependiendo ello de ciertas condiciones climáticas o topográficas de la región. Eventualmente, entonces, puede producir, a nivel ambiental, mayores daños que los inicialmente estimados.

[Al nivel del impacto producido por los aerosoles atmosféricos sobre una ciudad, al menos son tres las grandes áreas a considerar: la pérdida de visibilidad, la generación de enfermedades o las predisposiciones a ellas, y el impacto sobre el medio ambiente construido.]

[La disminución de la visibilidad crea una sensación de desagrado y de incomodidad que se ve incrementada por la falta de belleza estética. Con el tiempo, estos efectos se suman a los producidos sobre la salud física y mental del individuo, provocando un impacto sobre su salud integral y bienestar general y, por ende, en su calidad de vida.]

En relación a las lluvias, el efecto de los aerosoles atmosféricos sobre la visibilidad de Santiago es muy claro (época de invierno). De acuerdo a la información disponible, en época de invierno (28), se puede observar que en la mañana precedente a un día de lluvia, la visibilidad es escasa. Dos días después de la lluvia, también en la mañana, la atmósfera se presenta clara y transparente. Pero, al cabo de una semana, la visibilidad es prácticamente nula.

[El efecto práctico de la lluvia es, por lo tanto, recuperar momentáneamente ciertas condiciones de calidad ambiental; al hacer disminuir temporalmente las concentraciones de partículas suspendidas, por efecto gravitacional y por disolución parcial del sulfato de amonio, principal responsable de la falta de visibilidad. Pero es absolutamente incapaz de disminuir los niveles de otros contaminantes y, por ende, de la contaminación total. La disminución de la visibilidad se reproduce rápidamente, ya que las partículas depositadas sobre el suelo, o al menos una fracción importante de ellas, vuelven al aire, recicladas como partículas de menor diámetro que las depositadas originalmente, por ejemplo por la acción de los vehículos motorizados. Esta nueva disminución de la visibilidad será tanto más acentuada cuanto más fuerte haya sido la lluvia, debido al arrastre de barro sobre las calles pavimentadas. Otras condiciones tales como las emisiones continuas, factores topoclimáticos y otros, pueden contribuir a generar una situación aún peor a la inicial.]

En Santiago, los primeros trabajos sobre visibilidad, mediante métodos ópticos, se han iniciado sólo en los últimos años (29, 30, 31).

En el aspecto salud, las encuestas epidemiológicas han permitido correlacionar la presencia de aerosoles atmosféricos con modificaciones en los síntomas y función respiratorios (32, 33, 34, 35, 36, 37), por ello es importante considerar el ingreso, forma de depósito y efecto de las partículas sobre el organismo.

Las partículas ingresan al organismo casi exclusivamente a través del aparato respiratorio. La Figura N° 5.20 (28), muestra la forma y extensión de la penetración que ocurre en función del tamaño de las partículas, ingresando en mayor cantidad y a mayor profundidad en la medida que disminuyen de tamaño, explicando así su mayor respirabilidad. Esta dependencia es el resultado de las características anatómicas del sistema respiratorio (35, 36).

La respirabilidad de las partículas se cuantifica en la Tabla N° 3 (28), donde se muestra que las partículas de tamaño menor o igual a 2  $\mu\text{m}$ , son 100% respirables, es decir, se depositan al nivel de los pulmones.

Tabla N° 5.3: Porcentaje de respirabilidad (\*) de los aerosoles atmosféricos en función del tamaño de partícula (\*\*), expresado en  $\mu\text{m}$ .

Respirabilidad (%)	0	25	50	75	100
Tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ )	10	5,0	3,5	2,5	2,0

(\*) **Polvo respirable**, definido como la fracción de polvo inhalado que se deposita en el epitelio no ciliado de las vías respiratorias.

(\*\*) **Tamaño relativo a diámetro equivalente**, esto es, diámetro aerodinámico de una partícula esférica de densidad unitaria.

[En el tracto respiratorio superior, las partículas de más de 5  $\mu\text{m}$  de diámetro, son filtradas desde el aire inhalado por la acción conjunta de los cilios del conducto nasal y la mucosa que cubre la cavidad nasal y la tráquea. Las partículas de diámetro entre 5 y 0,5  $\mu\text{m}$ , pueden depositarse hasta en los bronquiolos, pero pocas llegan a los alvéolos pulmonares. Estas partículas son generalmente eliminadas por los cilios de los bronquios y bronquiolos al cabo de algunas horas. El continuo movimiento ondulatorio de los cilios permite mover el mucus, de modo que las partículas atrapadas se desplazan hacia la faringe, donde pueden ser eliminadas por deglución o expectoración (32).]

[Las partículas de diámetro inferior a 0,5  $\mu\text{m}$ , pueden traspasar los mecanismos de defensa del tracto respiratorio superior, penetrar profundamente en las vías respiratorias e instalarse en los alvéolos. Su eliminación no es ni tan rápida ni tan completa como la que ocurre en los conductos más grandes. Aquí no hay sistema

mucociliar transportador que ayude al proceso. El tiempo de residencia entonces se prolonga por semanas, meses y años (35, 38).]

El material particulado que entra y permanece en los pulmones puede ejercer su efecto tóxico de tres maneras distintas: ]

- ✓ Las partículas que son inocuas por su composición química, interfieren con los mecanismos de limpieza del tracto respiratorio, impidiendo o retrasando la eliminación de otras partículas más nocivas. Las respuestas fisiológicas observadas incluyen un descenso en los movimientos ciliares, así como del flujo del mucus en las ramificaciones bronquiales (32).
- ✓ Las partículas pueden adsorber o absorber gases irritantes y, de esta forma, posibilitar el acceso a las áreas sensibles de los pulmones. El proceso de fijación ocurre cuando una molécula choca contra la superficie de la partícula y se adhiere o fija a ella. Esta fijación puede producirse de tres formas diferentes: si la molécula que choca se mantiene en la superficie, hay adsorción; si ocurre una interacción química entre la molécula que choca y la superficie de la partícula, hay quimiosorción; si la molécula se disuelve en la partícula, hay absorción (32).
- ✓ El proceso de transformación del  $\text{SO}_2$  en ácido sulfúrico y en sulfato, constituye un ejemplo clásico de estos procesos de fijación. Muchos investigadores piensan que los sulfatos constituyen el peligro más serio presente en la contaminación atmosférica urbana para la salud, puesto que su poder como agente irritante es tres a cuatro veces mayor que el del  $\text{SO}_2$ .
- ✓ Las partículas pueden estar formadas por compuestos intrínsecamente tóxicos, por lo tanto, afectar directamente al organismo. Dichas partículas raras veces se encuentran en el aire en concentraciones elevadas, sin embargo, su acción puede desarrollarse estando presentes a nivel de trazas.

[Los sulfatos y los nitratos que se encuentran entre las especies abundantes en los aerosoles atmosféricos, son potencialmente muy peligrosos, tanto para la salud de las personas como para los vegetales (39), para la vida acuática y los materiales (40), y tienen alta responsabilidad en la pérdida de visibilidad.]

Los sulfatos pueden representar hasta el 50% de la fracción fina de los aerosoles atmosféricos en las áreas rurales y urbanas (25). Los nitratos muestran, por lo general, concentraciones menores que los sulfatos, pero en algunos casos la situación puede invertirse (24). Para confirmar el impacto sobre el medio ambiente causado por estas especies, es muy importante la caracterización de la distribución masa tamaño para partículas que contienen nitratos y sulfatos.

En toda el área ocupada por Santiago, las concentraciones de material particulado son muy altas, lo que justifica el análisis de este contaminante con el mayor detalle.

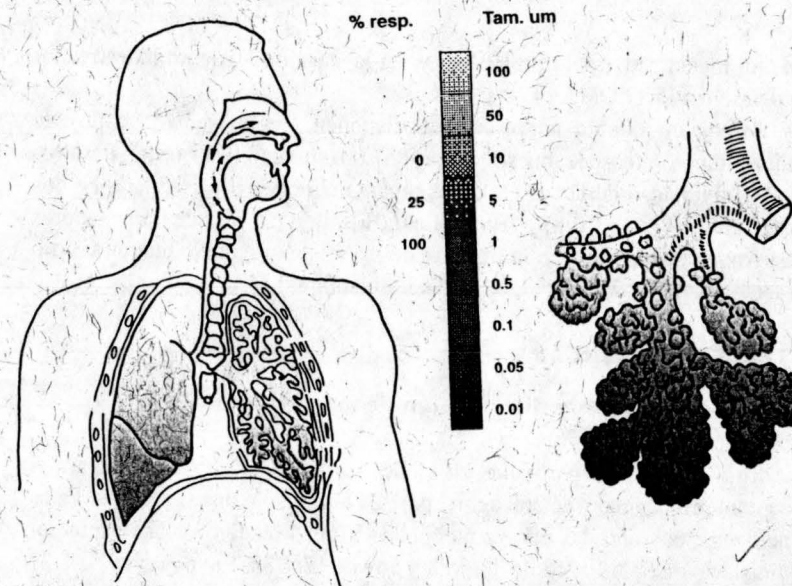


Figura N° 5.20: Grado de penetración en el organismo de las partículas respirables en función de su tamaño.

Fuente: Préndez et al, 1991, ref 28.

## MÉTODOS E INSTRUMENTACIÓN UTILIZADOS EN SANTIAGO

En Santiago, las determinaciones de material particulado se han efectuado a nivel de investigaciones científicas realizadas por grupos universitarios y a nivel de monitoreo mediante las dos redes del Servicio de Salud del Ambiente.

En la red de vigilancia, el material particulado total menor de  $45 \mu\text{m}$ , se recolecta mediante muestreadores de alto volumen (Hi-Vol), en un sistema manual que opera cada 2 ó 3 días por períodos de 24 horas, ubicados, originalmente, en 15 estaciones de muestreo, cubriendo así una amplia zona central y periférica de la ciudad. Actualmente, sólo se encuentran en operación ocho estaciones, de las cuales dos corresponden a la zona más céntrica de la ciudad y dos al área periférica (11).

Las mediciones en la red MACAM se efectúan en forma continua, mediante un monitor que utiliza el principio de la atenuación beta para partículas de diámetro menor de  $10 \mu\text{m}$ , y entrega información para períodos de 1 hora. En forma semicontinua, por períodos de 24 horas, se utiliza un muestreador de bajo volumen, llamado dicótomó, que separa el material particulado en dos fracciones, una gruesa entre 10 y  $2,5 \mu\text{m}$  y una fina con un diámetro menor a  $2,5 \mu\text{m}$ . En la estación B, se dispone



además de un muestreador del tipo Hi-Vol y, en la estación D, de un muestreador continuo denominado TEOM.

Los grupos de trabajo universitarios disponen (según sea el grupo) de muestreadores dicotómicos; de muestreadores "SFU o stacked filter unit", desarrollados en la Universidad de Davis (41), que separan el material particulado en dos fracciones: "gruesa" (10 a  $1\ \mu\text{m}$ ) y "fina" (1 a  $0,01\ \mu\text{m}$ ); o también de impactadores de cascada Andersen que separan la fracción de material particulado menor a  $3\ \mu\text{m}$  en seis fracciones (2,84, 2,04, 1,40, 0,80, 0,41 y menor a  $0,41\ \mu\text{m}$ ).

### CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

#### Perfil de concentraciones y distribución de masa versus diámetro de partícula

La norma oficial para partículas en Chile corresponde a  $75\ \mu\text{g m}^{-3}$ , para el promedio geométrico anual y de  $260\ \mu\text{g m}^{-3}$  para 24 horas, sólo una vez al año. Estas concentraciones están referidas a polvo menor de  $45\ \mu\text{m}$ , de acuerdo a las Resoluciones del Ministerio de Salud 1215 de 22/6/78 y 369 de 12/4/88. En la Figura N° 5.21 (11, 42), para aerosoles menores de  $45\ \mu\text{m}$ , se muestra que las concentraciones de partículas, en las diversas áreas de la ciudad, se han mantenido, en líneas generales,

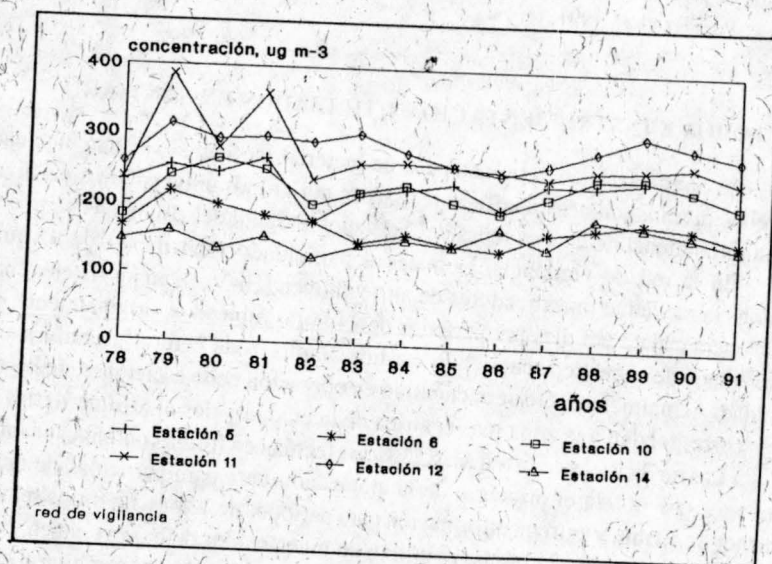


Figura N° 5.21: Concentraciones anuales promedio de material particulado menor de  $45\ \mu\text{m}$ , para algunas estaciones de monitoreo de la red de vigilancia.  
Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: M.M. Préndez.

sensiblemente constantes durante la última década. Sólo en el caso de la estación 14 (La Granja), se observa un ligero aumento. Esta zona, anteriormente era un área periférica netamente agrícola, pero en los últimos años ha incrementado notoriamente sus características residenciales.

En toda el área de la ciudad, las concentraciones promedio anuales son mayores o mucho mayores al valor de la norma anual, lo que implica que la norma para 24 horas ( $260\ \mu\text{g m}^{-3}$ ), también ha sido frecuentemente superada. En el área periférica de Pudahuel (estación 12), las concentraciones promedio anual son tan altas como la norma definida para un día, la que sólo debe ser excedida una vez al año.

Esto demuestra con claridad que el problema de contaminación por partículas en Santiago no es en absoluto un hecho reciente, situación ya antes observada (1, 11, 23, 42, 43).

No obstante, esta información resulta totalmente insuficiente para poder evaluar los eventuales efectos de las partículas sobre la salud de la población. En el sentido sanitario, es más importante saber lo que sucede en el rango de partículas respirables, más estrecho, pero con efectos potenciales mayores. Para este rango del aerosol, no existe una norma oficial en Chile, aun cuando se utiliza extraoficialmente la norma de la Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos (EPA), de  $50\ \mu\text{g m}^{-3}$  como promedio anual y de  $150\ \mu\text{g m}^{-3}$  para 24 horas (Programa de Descontaminación, Abril 1990. Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana).

La instrumentación necesaria para cuantificar este rango de partículas, a nivel de monitoreo oficial, está centralizada en la red MACAM. Como es mucho más reciente y se restringe a un área urbana central, deja sin evaluación adecuada a las zonas suburbanas y no necesariamente representa de manera completa lo que sucede en la totalidad del área urbana.

Como se aprecia en la Figura N° 5.22, los promedios anuales son sistemática y ampliamente superados en todas las estaciones. Los valores superan en más del doble la norma anual de la EPA, siendo mayores en la estación D (Parque O'Higgins). Además, las concentraciones no han variado prácticamente desde 1989, lo que confirma lo anteriormente dicho para el polvo menor a  $45\ \mu\text{m}$ .

El análisis de tendencia mediante los promedios móviles de los últimos 12 meses, presentado en la Figura N° 5.23 (23), pareciera indicar que, efectivamente, los valores promedio se han mantenido constantes, no obstante los esfuerzos realizados en los últimos años para atacar el problema de la contaminación atmosférica. La pequeña disminución observada en el promedio de máximos, entre las mediciones de 1990 y las de 1992, se transforma en un aumento en los últimos 5 meses.

Las concentraciones de aerosoles respirables son máximas en los meses de invierno, como lo demuestra la Figura N° 5.24. Los valores promedio disminuyen hacia los meses de primavera y verano, sin embargo, ellos superan ampliamente la norma de la EPA. Esto queda confirmado también por otras informaciones (1, 11, 23, 28, 42).

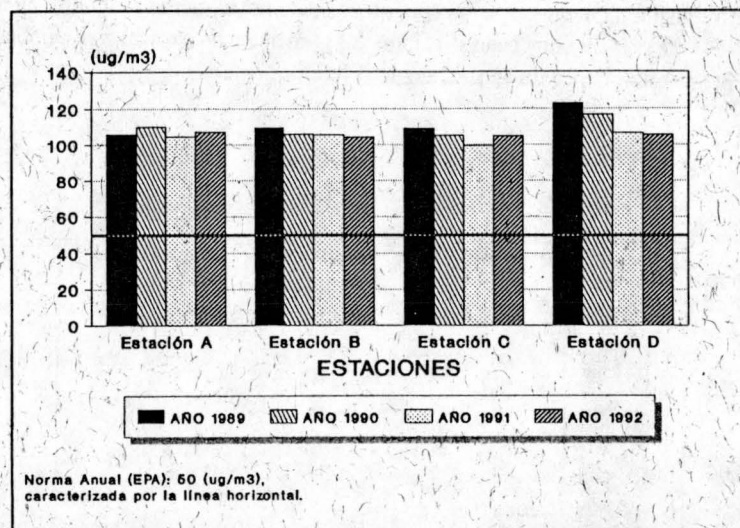
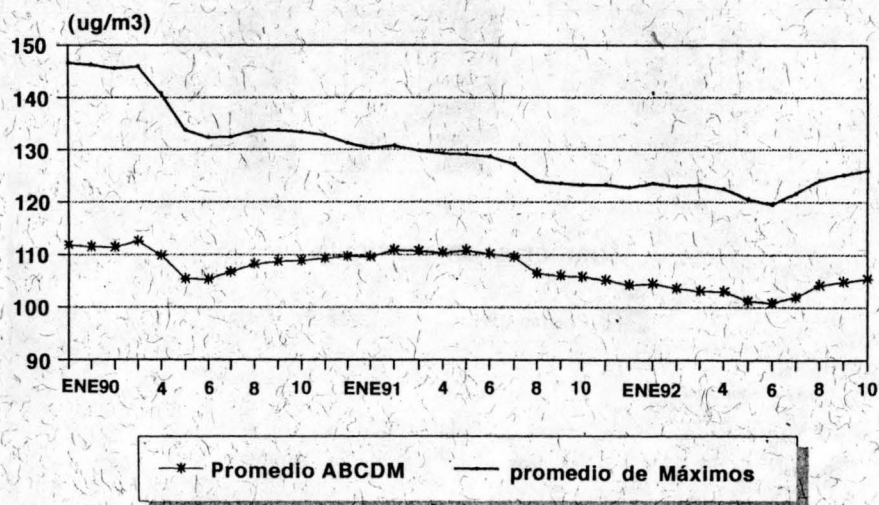


Figura N° 5.22: Concentraciones anuales promedio de material particulado menor de 10  $\mu\text{m}$  (PM10), para diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



Promedios de los últimos 12 meses  
a partir de Diciembre de 1989

Figura N° 5.23: Concentraciones mensuales promedio móviles de material particulado menor de 10  $\mu\text{m}$  (PM 10), para diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

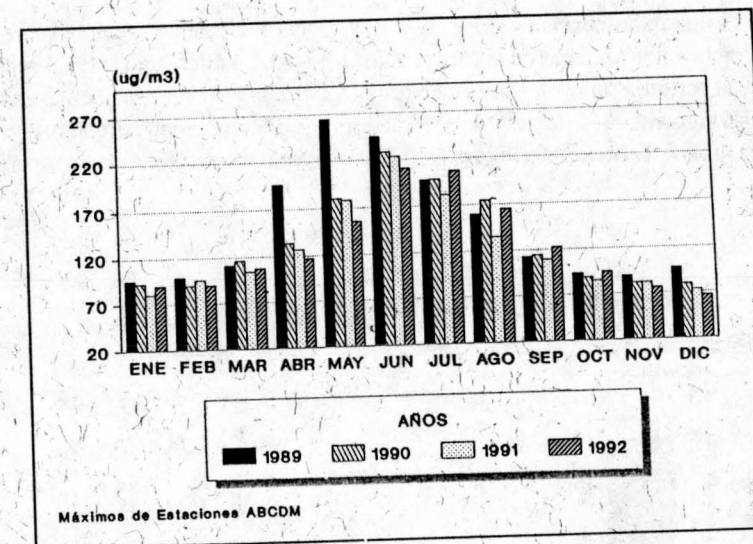


Figura N° 5.24: Concentraciones máximas mensuales promedio de varios años de material particulado menor de 10  $\mu\text{m}$  (PM 10), para diferentes estaciones de monitoreo de la red MACAM.

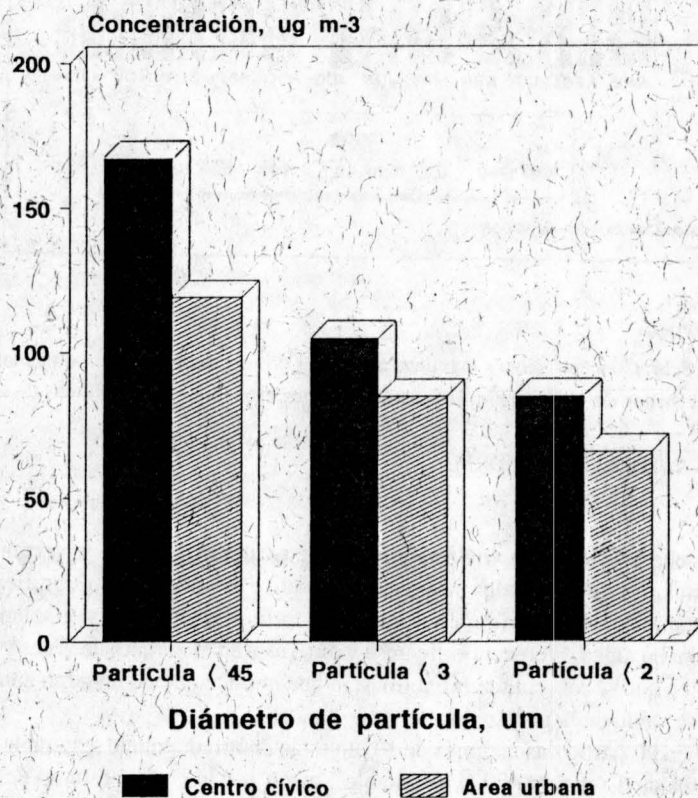
Fuente: SSA; Tratamiento: CEDRM.

Se debe recalcar que incluso en los meses de primavera y verano las concentraciones de partículas se encuentran sobre la norma. Esto significa que existe contaminación del aire durante los meses de primavera y verano y no solamente en invierno. La única diferencia entre unos y otros está en el número de veces y en la magnitud en que se sobrepasan las normas, lo que implica que en invierno aumenta el riesgo de salud de la población.

Si bien las partículas menores de 10  $\mu\text{m}$  están dentro del rango respirable, sólo las menores de 2  $\mu\text{m}$  son 100 % respirables, razón por la cual el estudio de estas últimas resulta esencial para evaluar el impacto sobre la salud, tomando como valor de comparación el polvo menor a 45  $\mu\text{m}$ . Como se muestra en la Figura N° 5.25 (28), en la época de primavera, de menor contaminación relativa, todas las concentraciones de partículas superan la norma y aquellas 100 % respirables, superan ampliamente la norma para 10  $\mu\text{m}$ , tanto en el área urbana central (nivel de la antigua estación 2, de la red de vigilancia) o centro cívico, como en el resto del área urbana (nivel de las estaciones 5, 6 y 10 de la red de vigilancia). La diferencia entre el centro cívico y el área urbana es más acentuada en partículas menores de 45  $\mu\text{m}$ , siendo poca la diferencia para las partículas respirables y las 100% respirables. En otoño (Figura N° 5.25b),



según el estudio, las concentraciones son mayores y, obviamente, siempre sobre la norma, incluyendo las áreas de la periferia de la ciudad. La diferencia entre el centro cívico y la periferia (nivel de las estaciones 13 y 14 de la red de vigilancia), para las partículas menores de  $45\text{ }\mu\text{m}$ , es más acentuada que la diferencia entre el centro cívico y el área urbana. En invierno (Figura N° 5.25c), los valores son ciertamente superio-



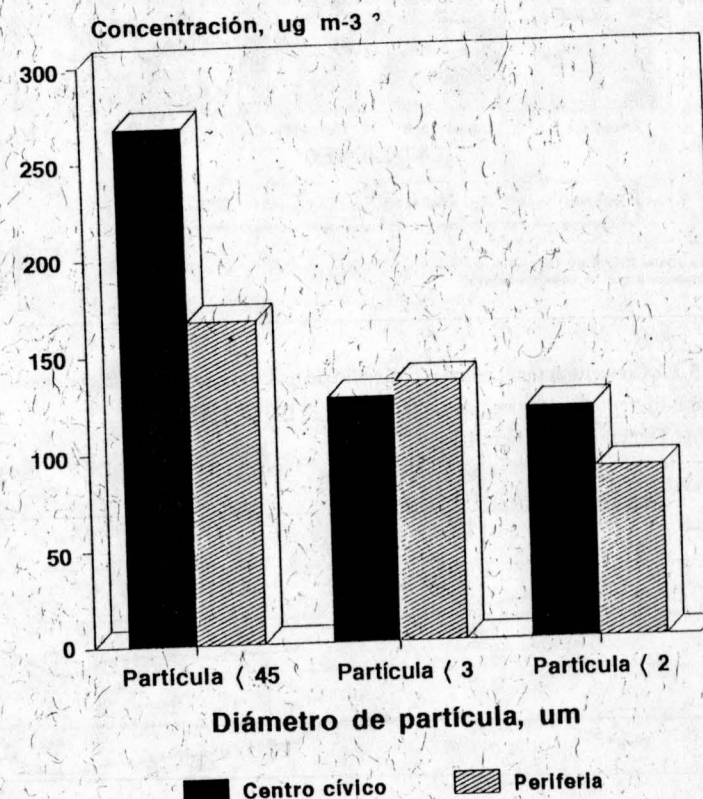
Impactador Andersen

Figura N° 5.25: Concentraciones promedio de material particulado menor de  $45\text{ }\mu\text{m}$  y material particulado fraccionado menor de  $3\text{ }\mu\text{m}$ , para diferentes épocas del año.

Fuente: Préndez et al, 1991, ref. 28.

Figura N° 5.25a: Centro cívico y área urbana, en primavera.

res en el centro cívico y en el área urbana. En la periferia, las concentraciones se mantienen sensiblemente iguales, excepto quizás para polvo menor de  $45\text{ }\mu\text{m}$ . En la Tabla N° 5.4, se presenta una cuantificación del porcentaje de partículas respirables sobre el polvo total menor de  $45\text{ }\mu\text{m}$ , según diferentes autores.



Impactador Andersen

Figura N° 5.25b: Centro cívico, área urbana y periférica, en otoño.

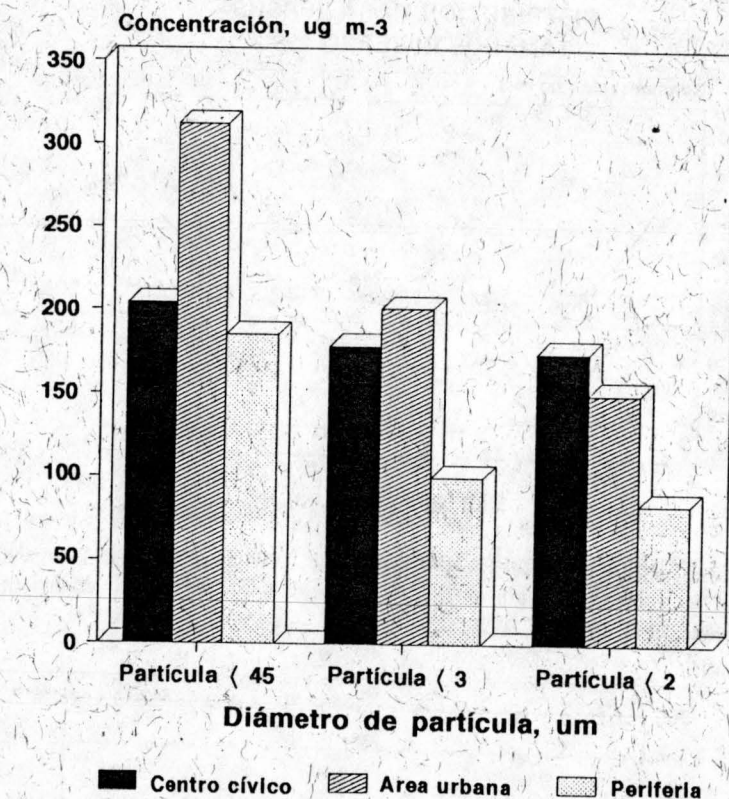


Figura N° 5.25c: Centro cívico, área urbana y periférica, en invierno.

Tabla N° 5.4: Porcentajes de partículas respirables, menores de  $2,5 \mu\text{m}$ (\*), menores de  $3 \mu\text{m}$ (\*\*) y menores de  $10 \mu\text{m}$ (\*\*\*), sobre polvo total menor a  $45 \mu\text{m}$ .

	A. Céntrica			A. Urbana			A. Periférica		
	< 2,5	< 3	< 10	< 2,5	< 3	< 10	< 2,5	< 3	< 10
Primavera	—	51	50	45	55	53	37	—	44
Otoño	40	45	—	42	—	—	42	53	—
Invierno	39	59	65	38	48	62	35	45	100

\* Referencia (1)

\*\* Referencia (28)

\*\*\*, Referencia (43)

Resulta interesante destacar el hecho de que, exceptuando el caso de la periferia en invierno, los porcentajes dentro de la ciudad son bastante concordantes, especialmente en primavera. Considerando que se trabajó con sistemas de recolección y en años diferentes, estos resultados probablemente reflejan la situación real de la ciudad de Santiago. Además se observa que el mayor porcentaje de partículas respirables corresponde a partículas 100% respirables. La discrepancia observada, en invierno, en la periferia, entre los valores informados por la referencia (43) y las referencias (1) y (28), se puede atribuir al hecho de que se trata de lugares de distintas características. En el primer caso, el lugar es claramente rural y no simplemente suburbano (o periférico) como ocurre en el segundo caso.

Además, en invierno, en el área central (equivalente al centro cívico), las concentraciones de partículas totales son 100% superiores a las del sector residencial y fuertemente influenciadas por el tránsito vehicular. En el sector residencial (equivalente al área urbana), el comportamiento de las concentraciones a lo largo del año indica una mayor contribución de distintos tipos de fuentes emisoras (43).

Otra información importante para el aerosol de alta respirabilidad, la constituye la forma de la distribución de la masa versus el tamaño de partícula. En la Figura N° 5.26 (44), se muestran algunos de los resultados obtenidos para las primaveras de 1988, a nivel de superficie ( $2,5 \text{ m}$ ), en un sitio urbano muy próximo a la estación C de la red MACAM, y para los años 1988 y 1989, sobre la capa límite atmosférica (CLA) en la cumbre del cerro San Cristóbal, a unos 30 metros sobre el nivel del suelo. Las curvas corresponden a valores promedio para muestras de 24 horas, recolectadas con un impactador de 8 etapas del tipo Berner.

Las partículas menores de  $0,5 \mu\text{m}$ , tienen, a nivel de superficie, una concentración 3 veces superior a la encontrada sobre la CLA. Las partículas mayores de  $1 \mu\text{m}$ , tienen una distribución bastante similar, ya sea sobre o bajo la CLA. Durante el año 1989, sobre la CLA, las partículas mayores de  $2 \mu\text{m}$ , son menos abundan-



### DISTRIBUCION MASA VERSUS TAMAÑOS PRIMAVERA

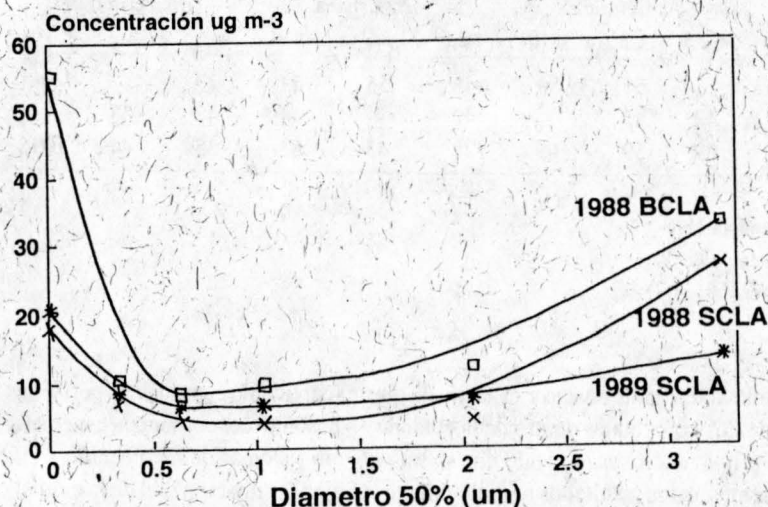


Figura N° 5.26: Distribución de masa versus tamaño de partícula para material particulado menor de  $3 \mu\text{m}$ , sobre (SCLA) y bajo (BCLA) la capa de límite atmosférico, en primavera. Fuente: Préndez et al, 1991, ref.44.

tes que en el año anterior, contrariamente a lo que ocurre para las partículas menores de  $0,5 \mu\text{m}$  (44).

En la Figura N° 5.27 (44), se muestran las curvas correspondientes a los valores promedio para el invierno de 1990, sobre y bajo la CLA. Las concentraciones son sólo un poco mayores a las observadas en la primavera de 1989, resultados que están de acuerdo con los valores dados por el sistema de monitoreo de la red MACAM, demostrándose así que las concentraciones promedio para material particulado inhalable (menor de  $10 \mu\text{m}$ ) fueron, en 1990, algo menores a las observadas en 1989.

Sin embargo, las formas de las distribuciones sobre y bajo la CLA, son bastante diferentes entre sí. En tanto que la forma de la distribución, bajo la CLA, se mantiene muy similar a la de la primavera de 1989, la forma de la distribución sobre la CLA cambia, apareciendo un máximo muy notorio, alrededor de  $0,5 \mu\text{m}$ , en lugar del aumento monotonónico de las concentraciones hacia las partículas menores de  $1 \mu\text{m}$ , como es el caso bajo la CLA.

Otro aspecto importante de analizar respecto del aerosol de la ciudad de Santiago, es su enorme variabilidad diaria, lo que se evidencia claramente en la

### DISTRIBUCION MASA VERSUS TAMAÑOS INVIERNO 1990

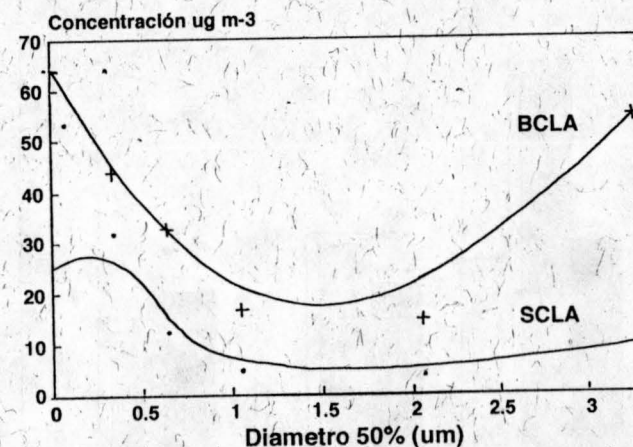


Figura N° 5.27: Distribución de masa versus tamaño de partícula para material particulado menor de  $3 \mu\text{m}$ , sobre (SCLA) y bajo (BCLA) la capa de límite atmosférico, en invierno. Fuente: Préndez et al, 1991, ref.44.

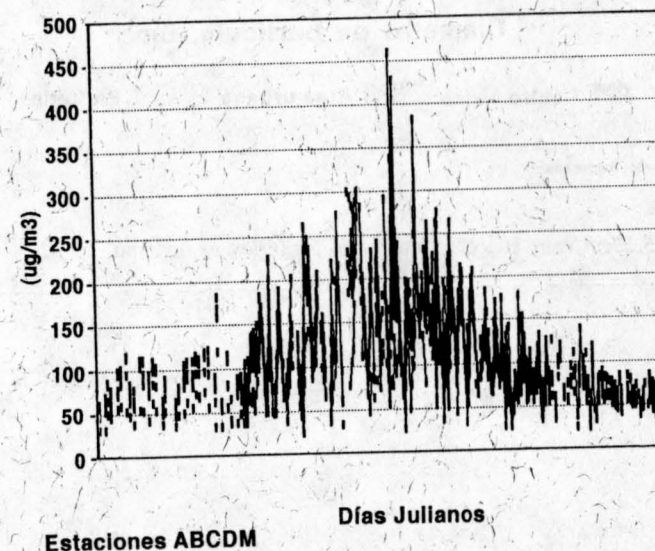


Figura N° 5.28: Concentraciones diarias de material particulado menor de  $10 \mu\text{m}$  (PM10), para las estaciones de monitoreo de la red MACAM. Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.

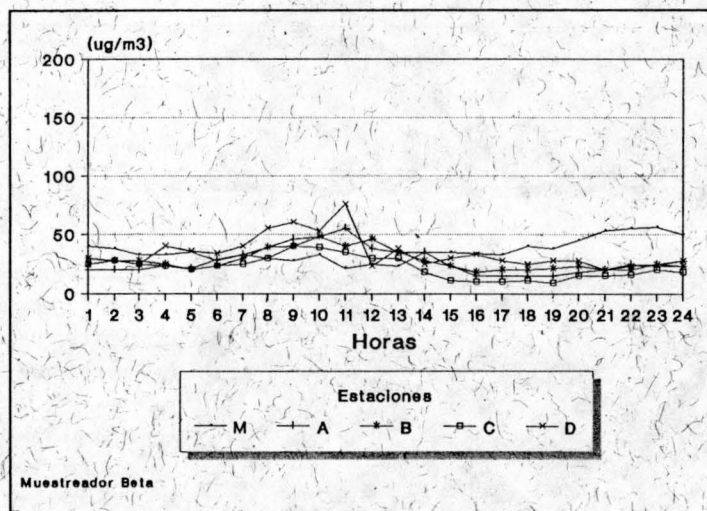
Figura N° 5.28 (23). Las mayores concentraciones en la estación D (O'Higgins), se encuentran en un máximo de  $450 \mu\text{g m}^{-3}$ , y las menores concentraciones, en la estación móvil, con  $50 \mu\text{g m}^{-3}$ .

Se puede concluir que las concentraciones promedio anuales, en realidad, no representan en Santiago todo lo que sucede con el material particulado, debido a su evidente estacionalidad.

El conocimiento de lo que sucede a lo largo del día, o el **perfil diario** de las partículas, requiere el uso de instrumentos de registro continuo. En Santiago son utilizados los monitores beta y TEOM.

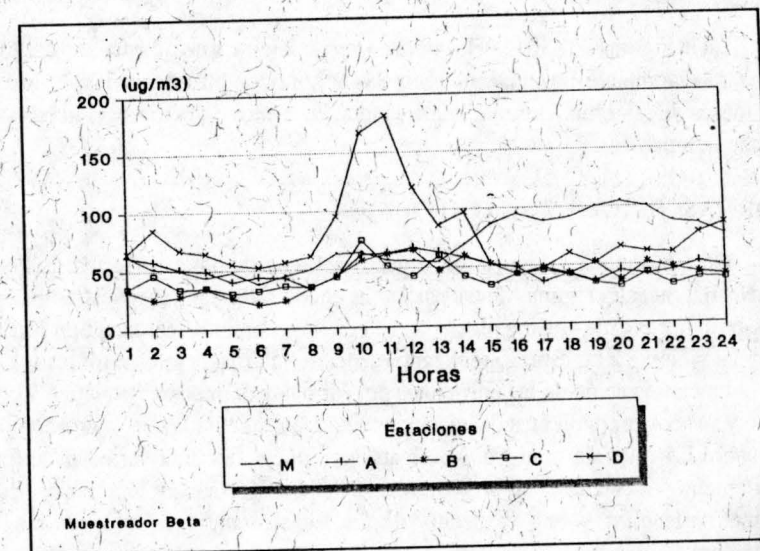
En la Figura N° 5.29 (23), se encuentra la información que entrega el monitor beta, instrumento que tiene serios problemas de calibración, por lo tanto, sólo puede ser utilizada con grandes precauciones y más que nada a título indicativo. El registro de las concentraciones de material particulado es más bien parejo: en él, prácticamente, se adivinan:

- en enero (Figura N° 5.29a), un máximo en torno a las 11 horas, en la estación D, y otro, probablemente en horas de la tarde, para la estación M;
- en julio (Figura N° 5.29b), nuevamente aparece un máximo cerca de las 11 horas en la estación D, y quizás otro hacia las 19 horas.

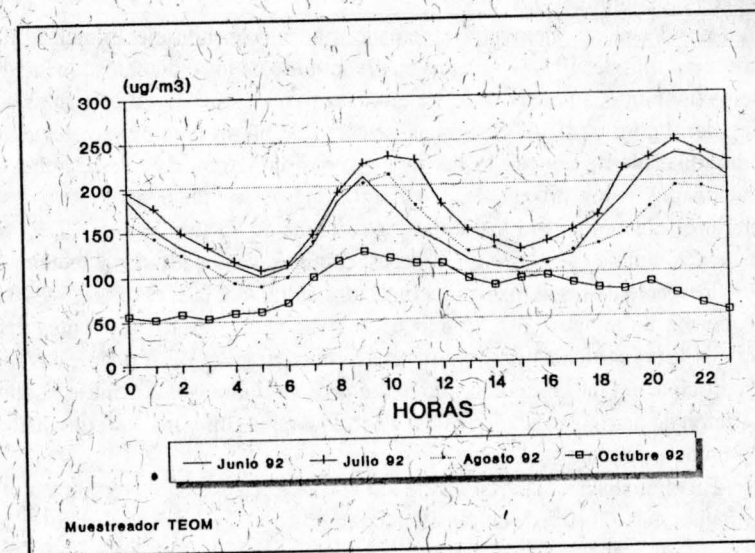


**Figura N° 5.29:** Concentraciones horarias promedio de material particulado menor de  $10 \mu\text{m}$  (PM10), para las estaciones de monitoreo de la red MACAM, durante enero (5.29a) y julio (5.29b) del año 1992.

Fuente: SSA; Tratamiento: CEDRM.



**Figura N° 5.29b.**



**Figura N° 5.30:** Concentraciones promedio horarias de material particulado menor de  $10 \mu\text{m}$  (PM10), mediante el sistema TEOM para la estación D de monitoreo de la red MACAM, durante 1992.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: CEDRM.



En la Figura N° 5.30 (23), la curva correspondiente a la información del TEOM, muestra claramente un máximo hacia las 9 horas, y otro hacia las 20 horas, en los meses de invierno. Durante la primavera, en el mes de octubre, el máximo de la noche desaparece.

### FORMAS: ORIGEN Y REACTIVIDAD

Otra información importante respecto de las partículas es su forma. La Fotografía N° 5.2, muestra algunas de las partículas encontradas en tres muestras escogidas, de cuatro horas cada una, recolectadas con un impactador de cascada tipo Andersen, correspondiente a un estudio realizado mediante microscopía electrónica (4).

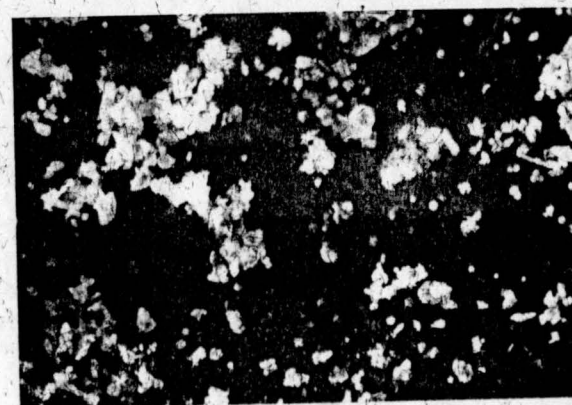
La clasificación de las partículas, por formas y diámetros aritmético y geométrico y sus correspondientes desviaciones estándar, efectuada con microscopio óptico sobre las fotos de microscopía electrónica, identifica una variedad de formas, ciertamente vinculadas a su origen, la existencia de formas preferenciales según el diámetro de ellas y una evidencia de las transformaciones que ocurren en la atmósfera.

Para los aerosoles recolectados sobre la CLA, entre las 5 y 9 AM, en un día típico de invierno, y para las partículas de diámetro teórico de  $2,84 \mu\text{m}$ , la forma predominante es la esférica. Para las partículas entre  $2,04$  y  $1,40 \mu\text{m}$ , las formas preferentes son la esférica y la irregular. En las partículas menores de  $0,8 \mu\text{m}$  la forma irregular es la que predomina (4).

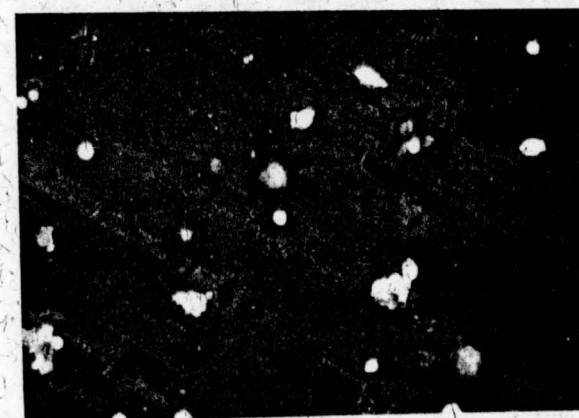
[En el análisis elemental efectuado con microsonda electrónica a unas 350 partículas, más del 10% (4) mostró un predominio de los elementos vinculados a los suelos (aluminio, sílice, potasio, calcio, hierro, manganeso), en partículas de forma irregular. En las partículas esféricas, se encontró un predominio de elementos tales como sílice, hierro, azufre, cloro, cinc y, en ocasiones, titanio y calcio, probablemente relacionados a los procesos de incineración] (45), y de acuerdo con resultados anteriores obtenidos para los aerosoles menores de  $45 \mu\text{m}$ , bajo la CLA (1). Estos elementos también se observan, a veces, en partículas cuadradas y rectangulares.

Respecto de los aerosoles recolectados sobre la CLA, entre las 6 y 10 PM del mismo día de invierno (4), se puede observar que, para los diferentes diámetros teóricos de las partículas, predominan las formas irregular y esférica y éstas aumentan su participación en la medida que disminuye su diámetro. Además, se observa la aparición de partículas hexagonales, y entre los  $2,04 \mu\text{m}$  y los  $1,40 \mu\text{m}$  de diámetro, la presencia de granos de polen.

En el análisis elemental efectuado con la microsonda electrónica a unas 570 partículas, más del 10% de las clasificadas muestra, en general, en partículas de forma irregular, el predominio de elementos tales como sodio, aluminio, azufre, cloro, potasio y calcio, originadas, posiblemente, en los procesos de incineración (46). Se encontraron además partículas esféricas de tres tipos: [blancas, muy pequeñas, compuestas principalmente de aluminio, fósforo, azufre y cloro; negras, muy peque



Aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile, mostrando su variedad de formas y tamaños. Fuente: Préndez et al, ref. 4.



Material particulado encontrado en dos muestras escogidas (a y b), de cuatro horas cada una, colectadas con un impactador de cascada tipo Andersen, correspondiente a un estudio realizado mediante microscopía electrónica. Fuente: Préndez et al, ref. 4.

[ñas, compuestas básicamente de sodio, aluminio y azufre, originadas posiblemente en la combustión de petróleo pesado (3); y unas blancas más grandes, compuestas principalmente de aluminio, sílice y cloro (en una proporción mayor que los otros elementos), calcio y hierro y, en algunas de ellas, vanadio, posiblemente originados en la combustión de petróleo pesado (3). Las partículas cuadradas identificadas, estaban formadas básicamente por sodio y cloro (sal) y, en algunos casos, también por aluminio, potasio, calcio y hierro, y pequeñas cantidades de silicio y titanio. Las partículas hexagonales consistían esencialmente en sodio, aluminio y azufre, originadas probablemente en la incineración o quema de combustibles fósiles, y en algunos casos trazas de cloro y silicio. Los granos de polen estaban compuestos básicamente de sodio, magnesio, aluminio, silicio, fósforo, azufre, cloro, potasio y calcio.] Estos resultados coinciden, en líneas generales, con resultados anteriores obtenidos en aerosoles menores de 45  $\mu\text{m}$ , bajo la CLA (1).

En los aerosoles recolectados en las últimas horas de la tarde y parte de la noche, se observó un número menor de partículas de mayor diámetro (entre 2 y 3  $\mu\text{m}$  de diámetro teórico) que en los aerosoles recolectados en la mañana temprano. Además, aparece un nuevo tipo de partículas de forma hexagonal con diámetros desde 2.84  $\mu\text{m}$  a 0.41  $\mu\text{m}$  (diámetro teórico). Por otra parte, se encuentran partículas de 0.41  $\mu\text{m}$  mejor definidas y no hay tantos aglomerados como en los aerosoles de la madrugada, pero existe un gran número de partículas esféricas y unas pocas de tipo rectangular (4).

En la Tabla N° 5.5, se muestra la comparación entre los diámetros teóricos de las partículas, dados por el fabricante, y los determinados experimentalmente para cada etapa. Puesto que un impactador de cascada garantiza un fraccionamiento teórico, efectuado por una calibración con un aerosol monodisperso, las explicaciones a las discrepancias se deben buscar en las reacciones posteriores que pueden ocurrir en el material impactado sobre los discos, o en el hecho de que la densidad unitaria de las partículas es sólo teórica y no se da en la práctica. Esta última hipótesis puede ser sustentada en base a determinaciones experimentales anteriores (1) y con los resultados encontrados en la etapa 5 de la muestra 2 (transformación durante la noche de las emisiones del día anterior). En ella se han acumulado las partículas más finas que, en la práctica, son las que muestran la discrepancia más amplia, debido al aumento de la cantidad de aglomerado de mayor tamaño (5,17  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio). Además, en esta misma etapa, se encuentran las mayores concentraciones de metales pesados tales como plomo y cadmio. Los resultados de la muestra 3, indican que la transformación de gases a partículas ocurre a lo largo del día y que los aerosoles secundarios formados son originalmente los de menor tamaño, afirmación sustentada en las mayores concentraciones de sulfatos y nitratos encontrados en las partículas iguales o menores a 0.41  $\mu\text{m}$  (4).

Se debe considerar que los resultados obtenidos para los aerosoles respirables menores de 3  $\mu\text{m}$ , incluyendo las curvas de distribución, sólo pueden ser aplicables al rango del aerosol recolectado por el instrumento utilizado. Bajo la CLA,

**Tabla N° 5.5:** Diámetros de partículas respirables de Santiago clasificadas de acuerdo al impactador utilizado y medidos con microscopía electrónica (4).

	Etapas				
	1	2	3	4	5
Diámetro teórico, $\mu\text{m}$ (desde catálogo)	2.84	2.04	1.40	0.80	0.41
<b>Muestra número 1:</b>					
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Aritmético)	3,33	2,71	1,80	0,86	1,37
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Geométrico)	2,79	2,34	1,78	0,76	1,54
Total partículas analizadas	555	275	312	186	517
<b>Muestra número 2:</b>					
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Aritmético)	2,45	2,06	1,33	2,07	5,17
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Geométrico)	2,20	1,88	1,22	1,79	4,48
Total partículas analizadas	611	653	555	239	773
<b>Muestra número 3:</b>					
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Aritmético)	3,82	2,95	2,75	1,60	1,26
Diámetro Partícula, $\mu\text{m}$ (Promedio Geométrico)	3,42	2,72	2,51	1,47	1,16
Total partículas analizadas	308	489	742	2110	1297

los aerosoles se pueden describir, en principio; mediante una distribución bimodal, independientemente del período considerado. Sobre ella, la caracterización del aerosol mediante la distribución masa versus tamaño de partícula, depende de la estación del año considerada. En primavera, el aerosol puede ser descrito más apropiadamente mediante una distribución bimodal; en invierno, en cambio, la distribución log-normal resulta más adecuada. El modo fino, no evidente en los aerosoles bajo la CLA, se desplaza hacia partículas más grandes. El modo de las partículas más grandes decrece a su vez, pero resulta mejor definido. Se observa entonces, especialmente durante el invierno, que la distribución bimodal bajo la



CLA, se transforma en long-normal sobre ella. Es posible que la explicación para esta situación se encuentre en la multiplicidad de fuentes que contribuyen al material particulado y, en otros casos, a la mayor o menor eficiencia de la CLA de limitar la libre difusión vertical de los contaminantes (4).

En la superficie, son varias las fuentes de aerosoles de diferentes tamaños que contribuyen con sus emisiones. Por una parte, están las partículas finas ( $< 1 \mu\text{m}$ ), procedentes de procesos de combustión y condensación de gases, que son muy reactivas. Por otra parte, están las partículas más grandes ( $> 3 \mu\text{m}$ ), emitidas desde el suelo; y, finalmente, las partículas de tamaño intermedio que, por acción antropogénica, reincorporan al aire el suelo contaminado con el depósito de aerosoles generados desde fuentes tales como el tránsito vehicular, las actividades de construcción, servicios, comercio, etc (4).

En los últimos años, dichas actividades se han incrementado de manera importante. De esta forma el aerosol generado bajo la CLA, resulta inestable y cambiante, tanto física como químicamente, y trata de difundirse verticalmente. La difusión horizontal está limitada por el alto porcentaje de calmas y vientos de baja intensidad (condiciones particularmente agudas en invierno), por vientos de direcciones opuestas durante el día y la noche, por la topografía del valle, la altura de los cerros que lo encierran, entre otras variables importantes. En el aerosol, entonces, pueden ocurrir fenómenos tales como la transformación gas-partícula, la coagulación de partículas muy pequeñas para formar otras más grandes y la sedimentación de las partículas más grandes. Todo esto, durante el proceso de difusión, provoca en el aerosol un empobrecimiento tanto de las partículas pequeñas (las muy pequeñas coagulan y crecen) como en las más grandes, y tiende a estabilizarse en torno a un diámetro preferencial, dando como resultado, sobre la CLA, un aerosol de conducta unimodal y distribución masa versus tamaño de partícula log-normal (4).

En primavera, período relativamente cálido, la CLA sube a una mayor altura debido a las corrientes de aire caliente generado en la superficie (47). En consecuencia, el aerosol puede difundirse verticalmente con mayor facilidad y no dispone del tiempo necesario para estabilizarse. Como resultado, su distribución masa versus tamaño de partícula no se modifica fundamentalmente (4).

Se evidencia entonces la efectividad de la CLA, como condición meteorológica que perturba la difusión vertical de los contaminantes, a través del cambio en la distribución masa-tamaño de partícula de los aerosoles atmosféricos respirables de la ciudad. Durante el invierno, esta CLA se sitúa preferentemente bajo los 890 m.s.n.m. (valor determinado por observación visual). En cambio, en primavera se encuentra a una altura mayor. Dado que la cantidad de fuentes emisoras no cambia estacionalmente de una forma drástica, sólo un 3,5 % según Riesco (48), esta diferencia en altura hace que el volumen disponible sea mayor para diluir los contaminantes en los períodos de primavera y verano y, por ende, se tenga la falsa sensación de que la contaminación ha disminuido o no existe durante estos períodos (4).

Los resultados obtenidos en años anteriores, bajo la CLA (4, 49, 50), en los

inviernos de 1981 y 1983, muestran que la curva de distribución, claramente log-normal en 1981, se ha ido transformando, hacia 1983, en una curva más bien bimodal. Ello debido al crecimiento del modo de partículas mayores de  $2,8 \mu\text{m}$ . Al comparar las primaveras de 1985 y 1989 (4), se encuentran distribuciones bimodales, pero con el modo de partículas mayores de  $2,8 \mu\text{m}$  notoriamente más desarrollado en 1989.

Una explicación a estos hechos podría encontrarse en el crecimiento desmesurado del área urbana, con la consiguiente mayor demanda de servicios tales como el transporte (con aumento de vehículos, número de kilómetros recorridos y consumo de combustible), la mayor construcción (tanto de edificios públicos como privados que conlleva un constante movimiento de maquinaria y de tierras, la incorporación a la ciudad de zonas industriales que antiguamente se ubicaban fuera de ella (4).

Puesto que la difusión horizontal es casi nula y la difusión vertical está dificultada por la presencia de la CLA, con una velocidad, atribuible al proceso, bajo o muy baja, estos hechos pueden constituirse en algunas de las razones que explique por qué los índices de contaminación atmosférica han seguido siendo muy altos, aún en invierno y durante ciertos fines de semana (4).

La reactividad del aerosol (4), se puede observar comparando las cantidades, tamaños y formas de las partículas recolectadas en la madrugada, esto es, que ha permanecido en la atmósfera durante varias horas (toda la noche) y aquellas recolectadas al anochecer y que, por lo tanto, son relativamente frescas. Esto es claramente visible con las partículas esféricas (básicamente derivadas de una transformación gas-partícula). El porcentaje de su participación en el aerosol fresco aumenta en la medida que su diámetro disminuye. Ocurre lo inverso en el aerosol envejecido.

Para cuantificar el aerosol que ingresa desde las áreas rurales, se han llevado cabo mediciones del material particulado existente fuera de la cuenca, el que constituiría el valor base. En general, las estimaciones de los distintos autores son concordantes, entregando valores que varían debido al tipo de muestreo y al rango de partículas considerado. Los valores se encuentran en torno a los  $45 \mu\text{g m}^{-3}$  para las partículas respirables, y a los  $60 \mu\text{g m}^{-3}$  para polvo menor de  $45 \mu\text{m}$ , con densidades similares a las del aerosol de Santiago, esto es, del orden de  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$  (1, 5, 12, 43).

#### CARACTERISTICAS QUIMICAS:

##### ELEMENTOS TRAZA, IONES INORGANICOS, COMPUESTOS ORGANICOS. DETERMINACION DE ORIGENES

[Para poder determinar el origen de los aerosoles atmosféricos es necesario analizar su composición química.]

En el caso de los aerosoles de Santiago, son algunos grupos universitarios los que han hecho el mayor aporte al estudio de la composición química de los aerosoles como por ejemplo su composición elemental (incluyendo Na, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Mg, Ti, Fe, Co, Ni, Cr, Mn, Cu, As, Sb, Hg, Zn, Cd, Pb y tierras raras). Para ello se ha utilizado diversas técnicas analíticas, entre otras la Espectrofotometría de Absorción.

[ción Atómica (EAA), el Análisis por Activación Neutrónica (AAN), la Fluorescencia de rayos X (FRX) o fluorescencia de rayos X inducida por protones (PIXE). Se han logrado identificar, además, algunos iones inorgánicos (sulfatos, nitratos, halógenos, amonio), así como también carbono elemental e hidrocarburos aromáticos policíclicos (3, 5, 6, 7, 28, 49, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64).]

Las determinaciones se han efectuado sobre polvo total, menor de 45  $\mu\text{m}$ , sobre polvo inhalable menor de 10  $\mu\text{m}$ , así como también sobre polvo fraccionado menor de 3  $\mu\text{m}$ . Las concentraciones de los diferentes elementos encontradas en las distintas fracciones del aerosol son, en líneas generales, del orden de las cuantificadas en otras ciudades muy contaminadas. No ocurre lo mismo con las altas concentraciones determinadas para sulfatos e hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Referente a los métodos utilizados para la determinación del origen de las diversas especies químicas en el aerosol, ellos caen, en general, dentro de la clasificación de los métodos orientados al receptor. Uno de estos métodos es el de los factores de enriquecimiento (FE). Los valores para los FE promedio, en diversos sitios de la ciudad, se han representado para algunos de los elementos evaluados con mayor frecuencia, tomando al hierro como elemento normalizador. Según este criterio, tendrán un origen natural aquellos elementos cuyos FE sean cercanos a 1. No existe ninguna norma nacional o internacional al respecto. Sólo se puede aceptar un determinado valor por simple experiencia (65).

En la Figura N° 5.31 (50), se presentan los factores de enriquecimiento promedio geométrico para aerosoles de alta respirabilidad, en diferentes puntos de la ciudad, coincidentes con algunas de las estaciones de la red de vigilancia. Las conclusiones respecto al origen de los elementos traza son también aplicables al polvo menor de 45  $\mu\text{m}$ .

[Así entonces, Fe, Mg y Mn, tienen un origen natural (1, 3, 50, 54, 55). A ellos se deben agregar Na, Al, Ca, Sc y Si (50, 54, 55, 57). Por su parte Ni, Cu, Zn, Cd y Pb, tienen un origen antrópico (1, 54, 55, 58). Se deben sumar, además Co, V, As, Sb, Hg y Ba, entre otros (54, 55).]

Otro criterio de clasificación consiste en evaluar el tamaño de la partícula en la que se encuentran los elementos. Habitualmente, los elementos naturales se encuentran en las partículas más grandes, en cambio, los elementos antropogénicos, que provienen corrientemente de procesos que ocurren a altas temperaturas, lo hacen en las partículas más finas. Si la distribución de las concentraciones elementales versus el tamaño de partícula es del tipo log-normal, es posible calcular el diámetro de masa medio, o MMD, para los diferentes elementos, y efectuar así su clasificación.

Al combinar los dos criterios indicados, se logra un excelente resultado en la determinación de los orígenes y de su fuente más probable, tal como se muestra en la Figura N° 5.32 (61). [Así, Pb y Cd son elementos que derivan de fuentes creadas por el hombre y que se emiten mayoritariamente en forma de partículas muy finas (1 a 2  $\mu\text{m}$ ), por consiguiente con una respirabilidad del 100%, tanto en el centro como en la periferia de la ciudad. De manera similar, Zn y Ni se presentan, en general, en]

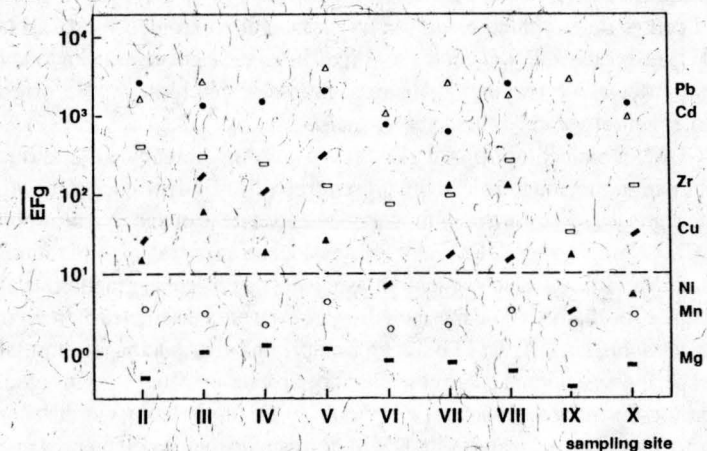


Figura N° 5.31: Factores de enriquecimiento promedio para material particulado fraccionado menor de 3  $\mu\text{m}$ , en diferentes estaciones de monitoreo de la red de vigilancia.

Fuente: Préndiz et al, 1989, ref. 50.

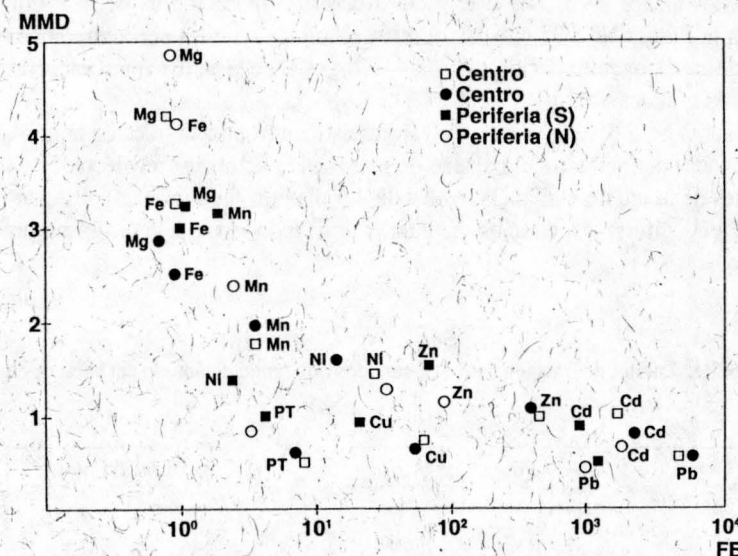


Figura N° 5.32: Diámetros de masa medio versus factores de enriquecimiento promedio para material particulado respirable menor de 3  $\mu\text{m}$  en diferentes estaciones de monitoreo de la red de vigilancia.

Fuente: Fuentes et al, 1985, ref. 61.



las partículas más pequeñas y con FE habitualmente superiores a 10]. El Cu que se observa en el centro de la ciudad es de origen claramente antrópico y está en las partículas 100% respirables. Por el contrario, Mg, Mn y Fe, se encuentran en toda la ciudad en las partículas de mayores diámetros, menos respirables, con un origen indudablemente natural y con su fuente en el suelo.

Bajo la CLA, los elementos Mn, Cu y Zn, tienen un comportamiento log-normal en primavera. En invierno, ningún elemento presenta este tipo de distribución. El Mg, aparentemente sigue una distribución bimodal en la época de primavera, tanto sobre como bajo la CLA. Por lo general, Cu, Zn y Pb, se encuentran asociados a partículas finas, en cambio Mg, Mn y Fe, se encuentran asociados a partículas grandes (4).

El análisis de los diámetros de masa medio (DMM), para diferentes elementos traza, muestra que sobre la CLA, Zn y Pb siguen siempre una distribución log-normal, sin importar el período estacional o año considerado. En cambio, Cu, Fe y Mn siguen la distribución log-normal en primavera e invierno, y Ca sigue la misma distribución en invierno. Los mayores valores de DMM corresponden a los elementos que, según el criterio de los FE, son clasificados como naturales: Ca, Fe y Mn. Y los menores valores de DMM corresponden a los elementos clasificados como antrópicos: Cu, Zn y Pb (4).

Utilizando todos los conceptos anteriores y cuantificando los FE para un número elevado de elementos, es posible separar la fracción natural de la antrópica. Para el aerosol menor de 3  $\mu\text{m}$ , la estructura de esta repartición es de la forma mostrada en la Figura N° 5.33 (49). Se observa el aumento de las concentraciones desde la parte antropogénica hacia las partículas finas y el de la parte natural hacia las partículas más grandes.

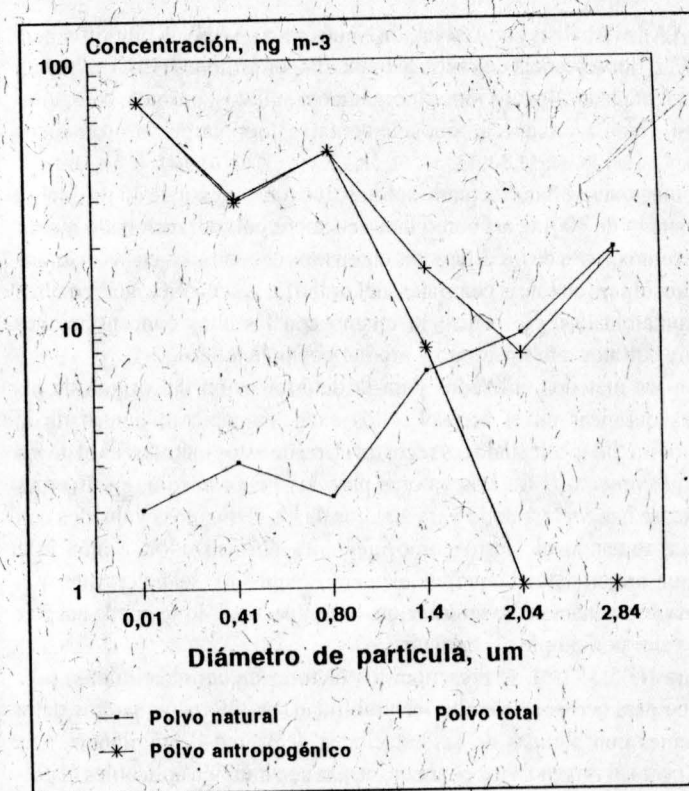
En la Tabla N° 5.6, se presentan los valores estimados para la fracción natural, con la aplicación del método del balance de masas para aerosoles recolectados en las estaciones de la red de vigilancia, realizada por distintos autores (1,5), utilizando metodologías diferentes, en años distintos y aplicando el modelo en forma independiente.

**Tabla N° 5.6:** Porcentajes de fracción natural estimados utilizando el método del balance de masas.

Area	Porcentaje		Concentración $\mu\text{g m}^{-3}$	
Céntrica	31(*)	60(**)	75	87
Periferia	62(*)	56(**)	145	25
Nivel base	—	60	—	19

\* Referencia (5)

\*\* Referencia (1)



**Figura N° 5.33:** Distribución del material particulado menor de 3  $\mu\text{m}$  en fracción natural y fracción antropogénica.

Fuente: Ortiz et al, 1982, ref.49.

Resultan evidentes las diferencias encontradas para el porcentaje correspondiente a la fracción natural en el área céntrica. No obstante, los aportes en la concentración son muy similares. Por otra parte, en el área periférica, los porcentajes son semejantes, pero no así las concentraciones. Apparently las diferencias metodológicas son las responsables de las discrepancias observadas.

Sin embargo, sin importar los porcentajes de fracción natural, su aporte a las concentraciones es de tal magnitud que resulta evidente que jamás será posible alcanzar la norma establecida o sugerida para polvo respirable, a menos que se eliminen todas las fuentes de polvo natural.

La variación en las concentraciones de los elementos, lo mismo que las concentraciones de partículas, es también un elemento de juicio en la asignación del origen de los elementos.

La Figura N° 5.34 (66), demuestra que efectivamente existe variación de las concentraciones a lo largo del día, la que depende del elemento considerado. Se observan algunos máximos al mediodía para Cu, Ni y Mn, y también algunos máximos en la noche, por ejemplo para Cu, Mn, y Zn. El plomo muestra sus máximos durante el día, entre las 12 y 16 horas y las 20 y 24 horas, las de mayor afluencia vehicular.

La importancia del plomo, desde el punto de vista sanitario, hace conveniente observar más detalladamente su comportamiento. En la Figura N° 5.35 (1), se observa que las dos estaciones centrales de la red semiautomática, muestran las mayores concentraciones, de Pb. Los valores para la estación periférica son menores. Esto refuerza la idea de un Pb de origen vehicular. La fuerte correlación entre plomo y bromo, que se muestra en la Figura N° 5.36 (58), es un antecedente adicional en este sentido, que se ve intensificado por las referencias de otros autores (59, 60).

Puesto que el plomo de origen vehicular debe tener sus mayores concentraciones en partículas menores de  $1\text{ }\mu\text{m}$ , la Figura N° 5.37 (51), compara la distribución de su concentración en función del tamaño del aerosol atmosférico y la distribución de la concentración de Pb en función del tamaño del aerosol emitido desde los tubos de escape de vehículos bencineros. No queda ninguna duda del origen vehicular del plomo en el aire de Santiago.

Otra especie química de suma importancia es el ión sulfato, ya sea neutralizado o como ácido sulfúrico libre. La Figura N° 5.38 (5), muestra que las concentraciones de sulfato en polvo menor de  $45\text{ }\mu\text{m}$ , pueden alcanzar valores tan altos como  $30\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ , en el centro de la ciudad y en invierno. En este caso, se sobrepasa la norma para el estado de California, Estados Unidos, que es de  $25\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ . En Chile no hay normas para la presencia de elementos traza en el aire. En la periferia los valores son del orden de  $22\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$  (5). En la misma Figura, se muestran también los contenidos de nitratos, iones amonio y halógenuros (5). Las concentraciones de estas últimas especies son bastante más bajas que las correspondientes a los sulfatos.

Las concentraciones promedio para sulfatos en el polvo respirable, en el período invierno-primavera, en el área urbana, se sitúan cerca de los  $15\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ , con algunos valores máximos de  $30\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ . En primavera-verano, los valores disminuyen a la mitad, tal como lo demuestran las Figuras N° 5.39a y 5.39b (2), o a un tercio, según señalan otros autores (4, 5, 7, 28). Estas Figuras muestran, además, que el ión sulfato se encuentra prácticamente concentrado en el rango de partículas menores de  $2,5\text{ }\mu\text{m}$ , por lo tanto, de alta respirabilidad. Los nitratos, los iones amonio y los halógenuros, al igual que los sulfatos, tienden también a concentrarse en las partículas más finas del polvo respirable (1, 6, 7).

Dichos resultados son concordantes con los obtenidos por otros autores para el rango del aerosol menor de  $3\text{ }\mu\text{m}$  (7, 28), demostrando que los sulfatos se encuentran mayormente en la fracción igual o menor a  $0,41\text{ }\mu\text{m}$ , representando el 23% del material particulado de este diámetro.

En relación a los compuestos orgánicos, es importante señalar que existen cuantificaciones para algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos. Las determina-

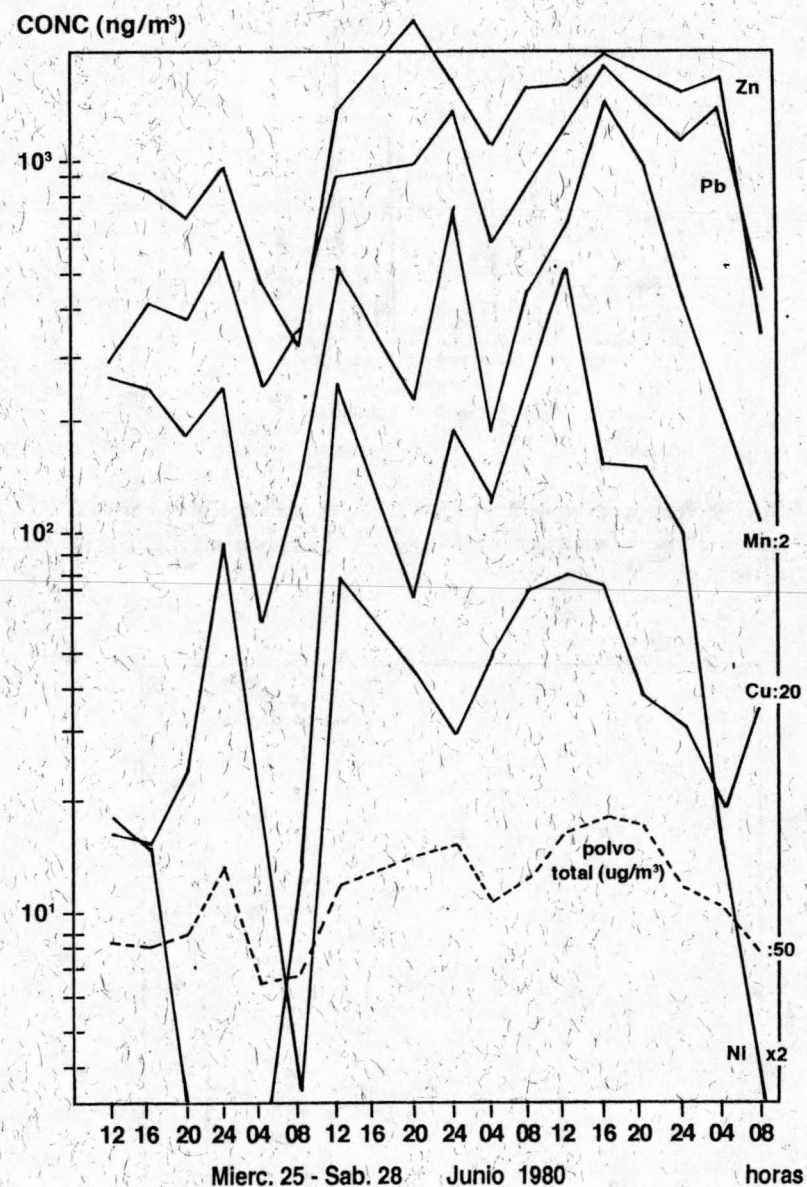


Figura N° 5.34: Variación a lo largo del día de las concentraciones elementales en polvo menor de  $3\text{ }\mu\text{m}$  en invierno.

Fuente: Ortiz et al, 1982, ref. 66.



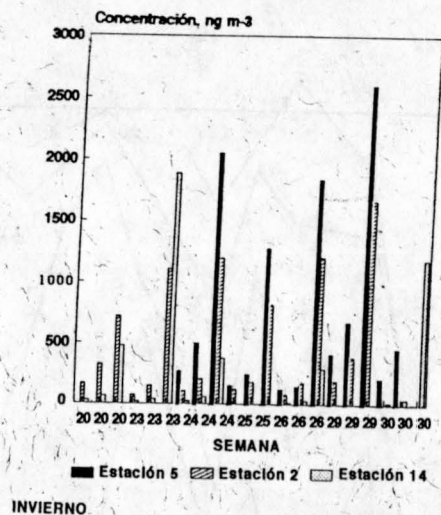


Figura N° 5.35: Concentraciones semanales promedio de plomo en material particulado menor de 45 µm, en algunas estaciones de la red de vigilancia, en invierno.

Fuente: ref. 1; Tratamiento: M.M.Préndez.

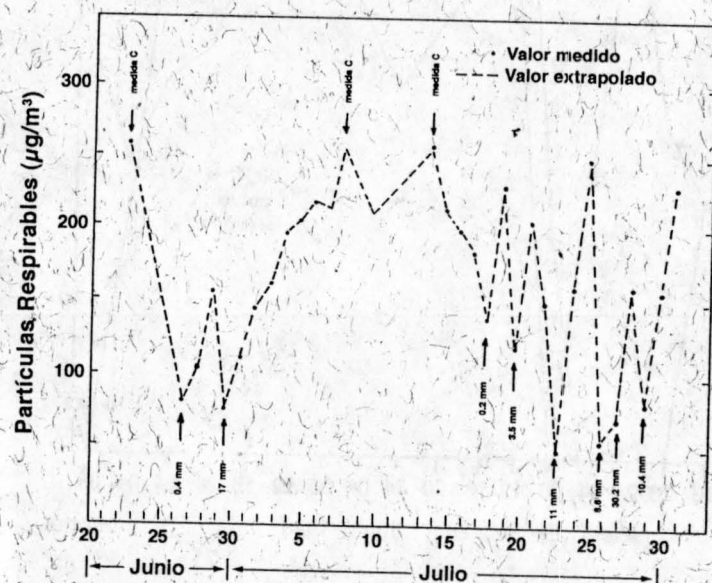


Figura N° 5.36: Correlación entre las concentraciones de plomo y bromo en material particulado menor de 10 µm, durante el invierno.

Fuente: Romo-Kroeger et al, 1989, ref. 58.

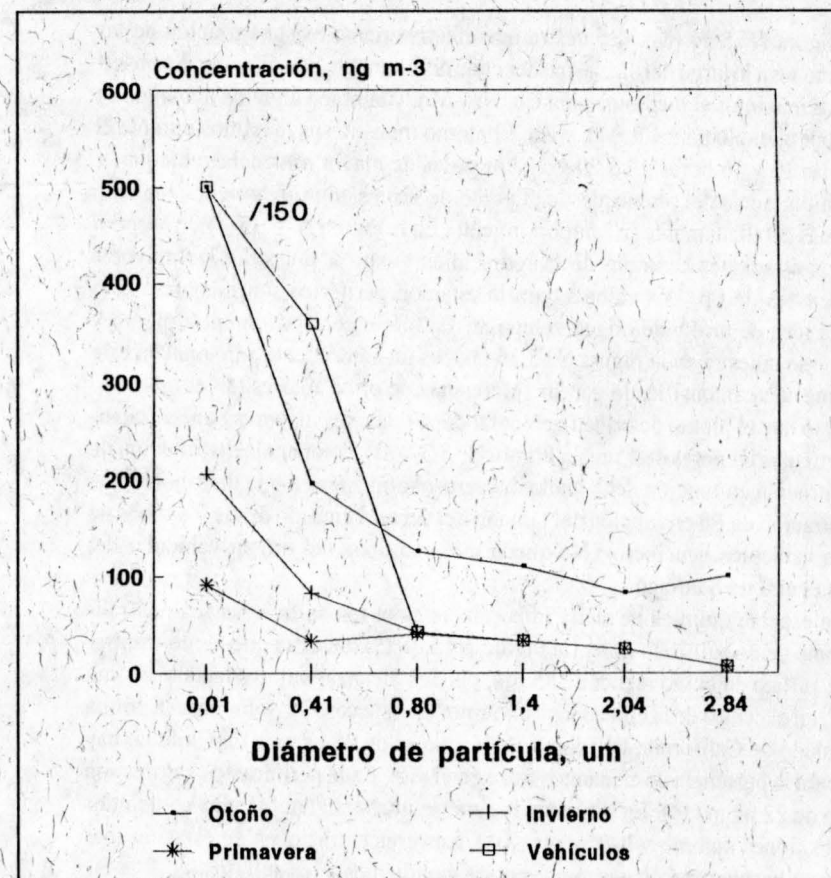
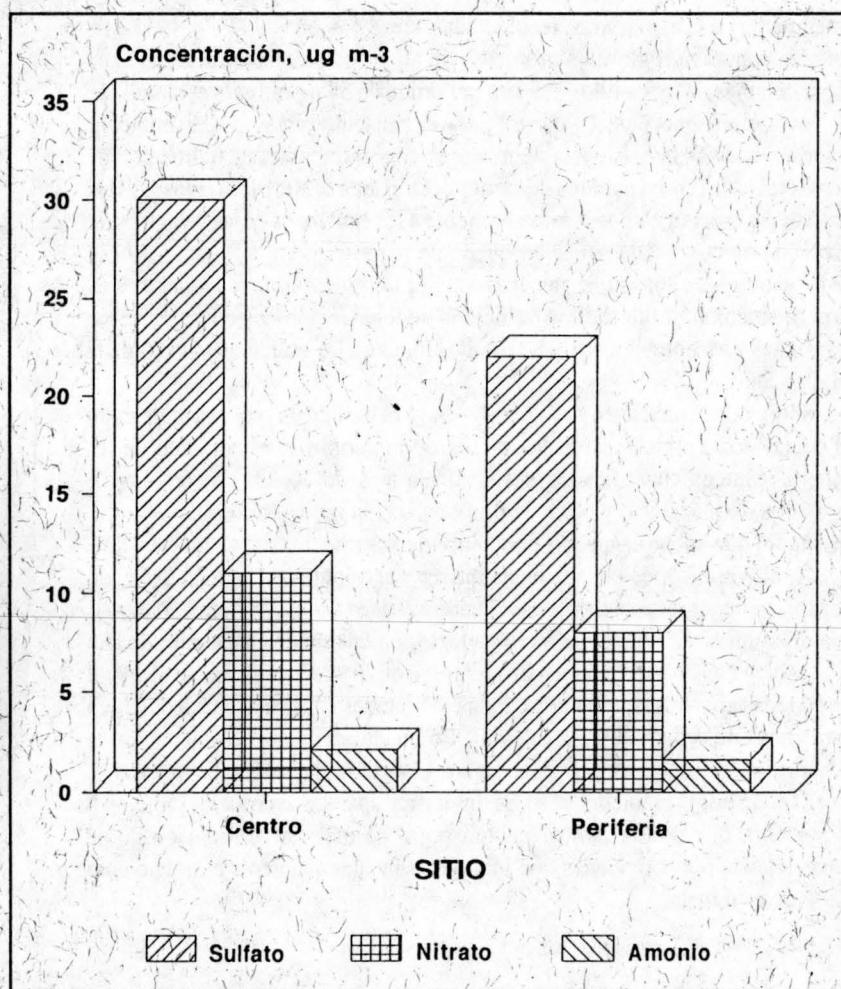


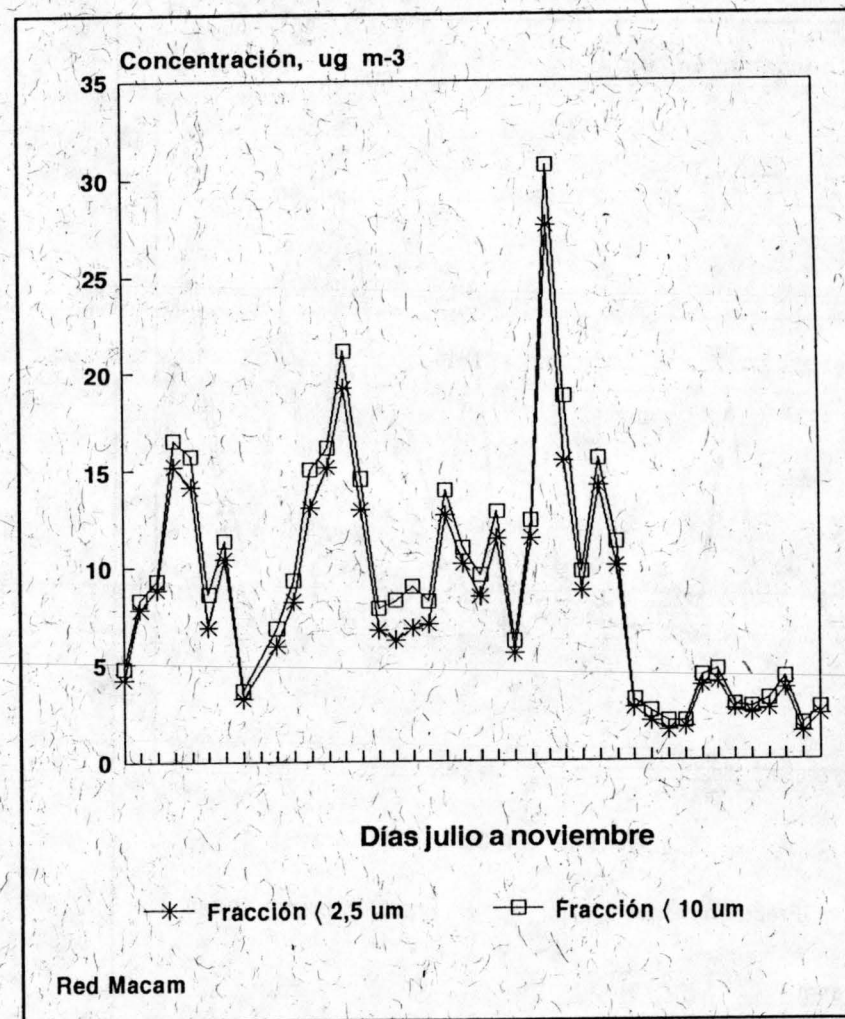
Figura N° 5.37: Distribución de la concentración de plomo versus tamaño de partícula para material particulado menor de 3 µm, en diferentes épocas del año y para las emisiones de los tubos de escape de los vehículos bencineros.

Fuente: Préndez et al, 1993, ref. 51.



**Figura N° 5.38:** Concentraciones de sulfato, nitrato y amonio en material particulado menor de  $45 \mu\text{m}$ , en 1983, en las áreas céntrica y periférica de la ciudad.

Fuente: De la Vega, 1986, ref.6; Tratamiento: M.M. Préndez.



**Figura N° 5.39:** Concentraciones promedio de sulfato para material particulado menor de  $10 \mu\text{m}$  y menor de  $2,5 \mu\text{m}$ : (a) para el período julio-noviembre de 1989; (b) para el período diciembre-marzo de 1990.

Fuente: ref. 2; Tratamiento gráfico: M.M. Préndez.



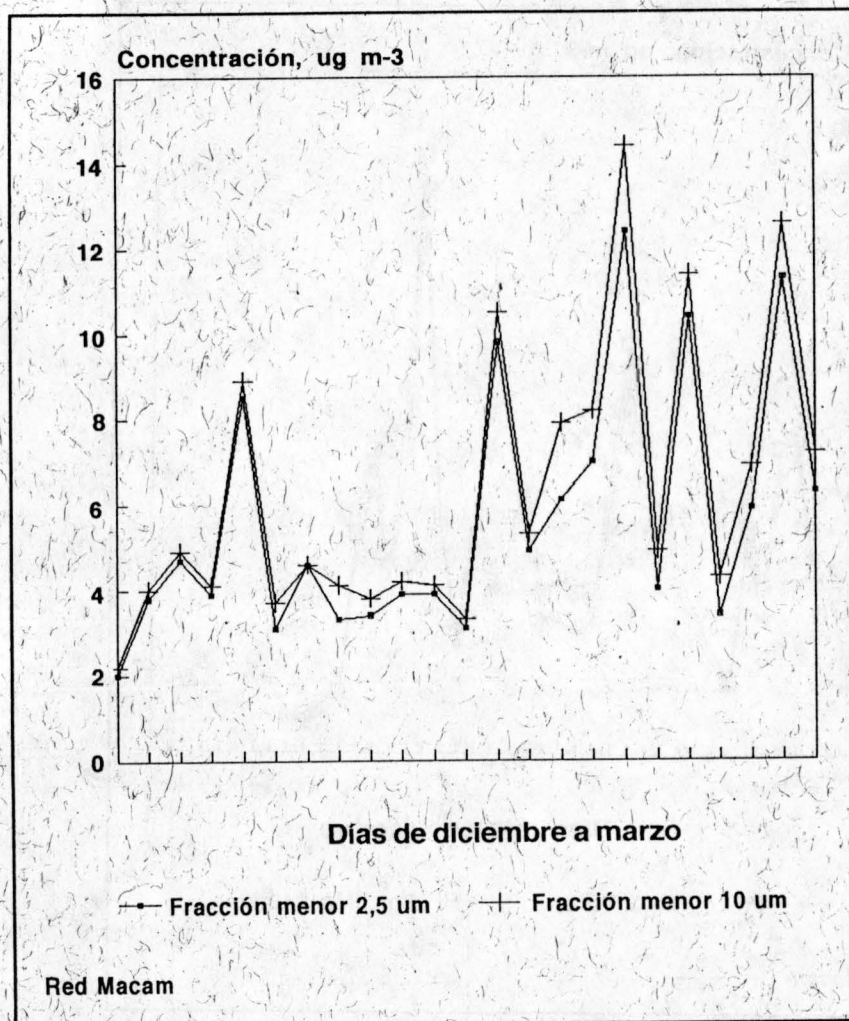


Figura N° 5.39b.

ciones efectuadas sobre muestras recolectadas entre los años 1979 y 1983 (1), muestran concentraciones globales promedio de algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos con más de tres anillos que son del orden de 54 ug m<sup>-3</sup> para el pireno, de 13 ug m<sup>-3</sup> para el criseno y de 10 ug m<sup>-3</sup> para el benzoalfapireno. La distribución espacial indica además la existencia de mayores concentraciones de hidrocarburos aromáticos totales, así como también de carbono, en el área central de la ciudad. Estos contaminantes se asocian entonces estrechamente a las emisiones de los vehículos de la locomoción colectiva. Esta situación queda de manifiesto en la Figura 5.40 (1), donde se muestran los altos valores alcanzados por los hidrocarburos aromáticos en la estación 5, sujeta a un fuerte flujo vehicular de locomoción colectiva, así como también las altas concentraciones de benzoalfapireno en las estaciones 5 y 10 de la red de vigilancia.

Los valores presentados en la Figura N° 5.41 (63), indican que existe un claro aumento de las concentraciones en los meses de invierno. En el conjunto de los compuestos orgánicos cuantificados destacan algunos de acción cancerígena de distintos grados de intensidad y otros de probada acción mutagénica.

Un estudio que aplica el análisis por componentes principales (4), muestra que, bajo la CLA, la presencia de elementos naturales y antrópicos en un mismo factor, destaca el aporte mayoritario del polvo reciclado desde el suelo contaminado por las emisiones de vehículos, calderas e incineradoras, en cualquier época del año. En primavera, si bien con un valor no muy diferente, se observa separadamente el aporte natural y el de las calderas. En invierno, todas las fuentes aparecen mezcladas y, en tercera prioridad, se separa el polvo natural. En cualquier época del año, sobre la CLA, el aporte mayoritario es del polvo natural, seguido del aporte de vehículos, calderas y, finalmente, incineradores. En invierno, aparece una fuente adicional (trazada por Cu), que podría indicar el transporte de material particulado desde fuentes más lejanas por actividades que incluyen fundamentalmente el tratamiento u obtención de este metal.

## CONSIDERACIONES FINALES SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE ALGUNOS DE LOS CONTAMINANTES CUANTIFICADOS EN SANTIAGO

La aplicación de modelos ha permitido determinar los orígenes y fuentes de algunos elementos y compuestos químicos al estado gaseoso o en el material particulado suspendido en el aire de Santiago, así como sus contribuciones al proceso de contaminación atmosférica de la ciudad.

Al analizar en conjunto los contaminantes gaseosos, se evidencian ciertos aspectos generales.

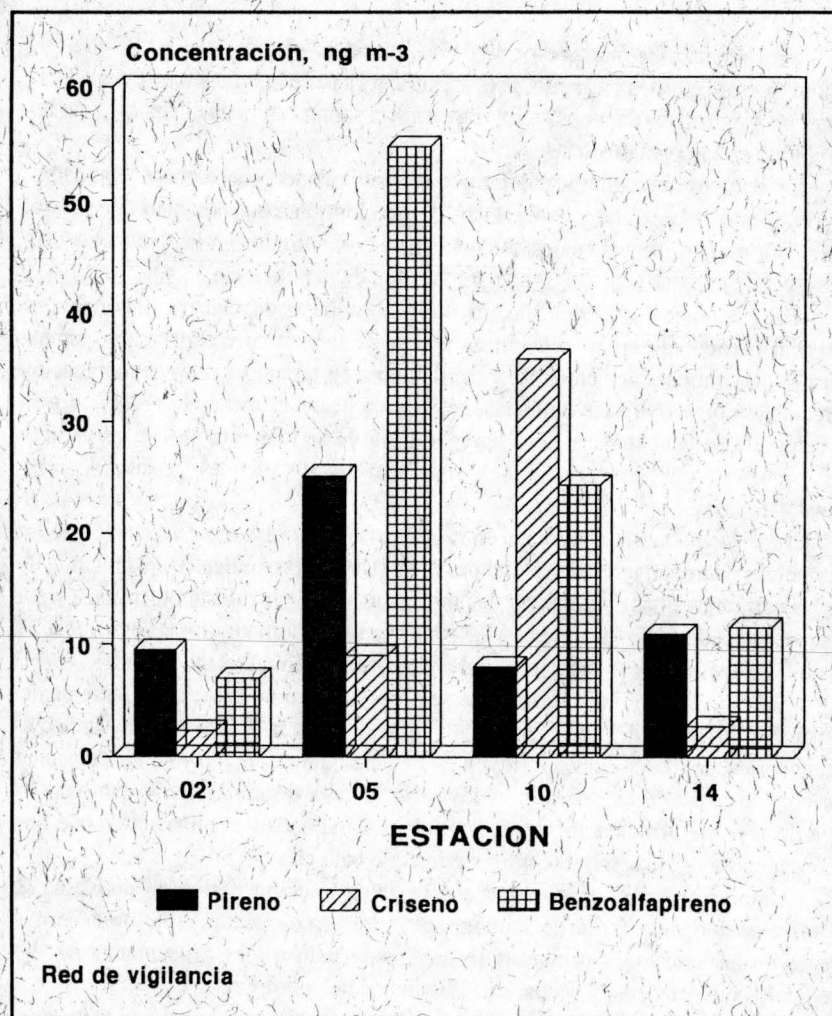


Figura N° 5.40: Concentraciones promedio de algunos hidrocarburos aromáticos polinucleares en invierno (mayo-julio de 1984), en algunas estaciones de la red de vigilancia.

Fuente: SSA; Tratamiento gráfico: M.M. Préndez.

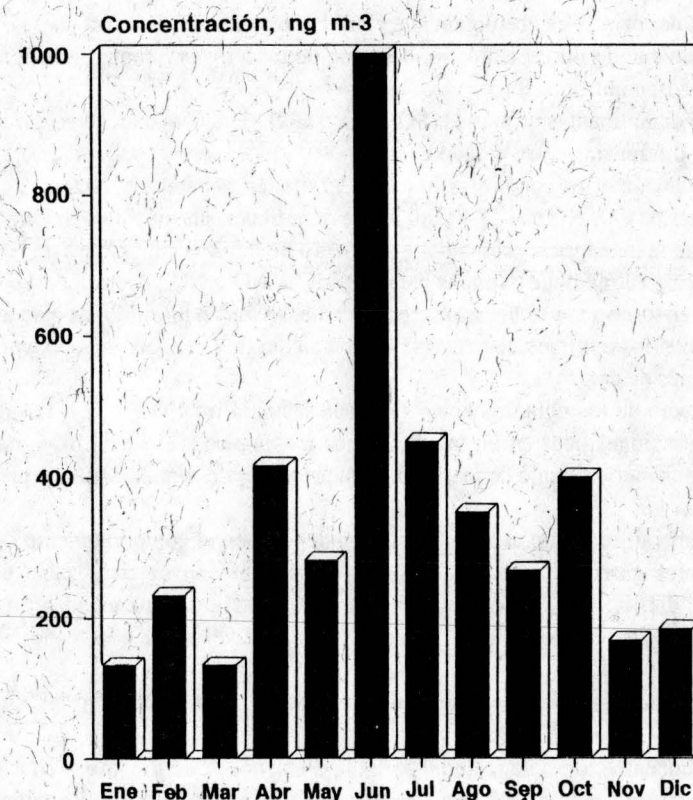


Figura N° 5.41: Concentraciones mensuales promedio de hidrocarburos aromáticos polinucleares para un sitio céntrico de la ciudad.

Fuente: Gil, L., Proyecto Fondecyt 1314/91, comunicación privada.

En líneas gruesas, las concentraciones de CO, a pesar de encontrarse sobre la norma en muchas ocasiones, no han aumentado sostenidamente a través de los años. Del mismo modo, no han aumentado las concentraciones de NO<sub>2</sub>, que en ocasiones superan la norma. En cambio, las concentraciones de SO<sub>2</sub>, habitualmente bajo la norma, se han mantenido a lo largo de los años o han disminuido en los últimos dos.

Los resultados para CO y NO<sub>2</sub>, resultan un tanto contradictorios cuando se analizan a la luz de su origen eminentemente vehicular y de la existencia de un parque automotriz en permanente crecimiento.

No existe información suficiente sobre los hidrocarburos gaseosos, ni sobre ozono, que permita establecer tendencias de largo plazo para estos contaminantes.



En el caso del ozono, es absolutamente clara la presencia de este compuesto como un contaminante de tipo secundario, derivado de reacciones fotoquímicas con precursores de tipo antropogénico.

Los contaminantes primarios ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ , y  $\text{CO}$ ), tienen un marcado ciclo anual, con claras diferencias entre verano e invierno.

En relación a los cambios a lo largo del día, en general, en verano, las concentraciones de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  e  $\text{HCT}$  y también de  $\text{SO}_2$ , tienen sus máximos en las primeras horas de la mañana, seguidos por el aumento de las concentraciones de  $\text{NO}_2$ .

Las concentraciones mínimas para  $\text{CO}$ ,  $\text{HCT}$ ,  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ , ocurren después del mediodía, en torno a las 15 horas. Posteriormente, aparecen los mínimos para el  $\text{SO}_2$  y, finalmente, los mínimos de ozono se presentan durante la noche en la mayoría de las estaciones de control.

Respecto de los contaminantes gaseosos secundarios ( $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ ), las mayores concentraciones ocurren en las estaciones más alejadas del centro, ya que se requiere de un cierto tiempo de reacción, de la presencia de contaminantes primarios y de la luz solar.

En general, se puede afirmar que las tendencias en el comportamiento de los contaminantes gaseosos primarios y secundarios, tanto en su ciclo anual como en su perfil diario, es el clásico descrito para otras ciudades contaminadas, en función de las fuentes emisoras, en especial el transporte vehicular y las condiciones meteorológicas.

En cuanto al material particulado de Santiago, se pueden hacer ciertas afirmaciones.

Las concentraciones de material particulado menor de  $45 \mu\text{m}$ , que permanente y sostenidamente superan la norma, no ha aumentado a lo largo de los años. La información sobre el material particulado menor de  $10 \mu\text{m}$  es aún insuficiente para afirmar con certeza que tampoco ha habido incremento, aunque ciertos indicadores permiten avanzar esta hipótesis.

En cambio, la distribución de masa versus el tamaño de partícula, se ha modificado en los últimos años, como probable consecuencia de una desmedida e incontrolada expansión urbana hacia sectores anteriormente de corte rural.

La fracción respirable ( $\text{PM}_{10}$ ) constituye un porcentaje elevado del aerosol total, usualmente más del 50%. Su concentración se encuentra frecuentemente sobre los valores aceptados en Chile, lo cual de por sí puede implicar riesgos a la salud de la población.

La distribución de la composición elemental de la mayor parte de los elementos analizados en el particulado de alta respirabilidad (menor de  $3 \mu\text{m}$ ), sigue una distribución del tipo log-normal, destacándose que aquéllos de origen antrópico, como por ejemplo el plomo, presentan una curva totalmente desplazada hacia partículas pequeñas y, por ende, de mayor toxicidad potencial. La de los elementos de origen natural, como por ejemplo el hierro, tienen su modo más desarrollado hacia partículas grandes.

La información primaria respecto de las correlaciones existentes entre sulfatos y amonio y entre nitratos y amonio, podría explicar en parte la formación de aerosoles de sulfato y de nitrato de amonio, de importancia significativa en el deterioro de la visibilidad en los períodos fríos.

[La composición química del material particulado, que incluye cantidades importantes de elementos y compuestos de tipo inorgánico y orgánico de probada toxicidad, muchos de los cuales se encuentran concentrados en las partículas más finas, puede generar serios riesgos para la salud de la población.]

En cualquier época del año, el suelo contribuye de manera importante al material particulado en suspensión en el aire y, si bien su composición química normal no contiene elementos tóxicos, debido a su tamaño y a su contaminación y reciclaje por actividades humanas, este polvo puede constituirse en tóxico para el habitante de la ciudad. Se debe agregar a esto la toxicidad propia de las partículas pequeñas, con concentraciones significativas de metales pesados y compuestos tóxicos.

La difusión vertical produce, en la mayoría de los casos, la eliminación de los aerosoles de tamaño intermedio (del orden de  $0,8 \mu\text{m}$ ) provenientes del crecimiento de las partículas finas emitidas por las industrias y los vehículos motorizados, y por las partículas de suelo (mayores de  $0,8 \mu\text{m}$ ) que se contaminan con las emisiones de los tubos de escape y se muelen por el rodaje de los vehículos motorizados.

Sobre la capa límite atmosférica, se observa un comportamiento diferente del aerosol a lo largo del día. Esto tiene relación con la formación de aerosoles secundarios, sobre los cuales influyen de manera importante, no sólo las emisiones de contaminantes y su difusión a través de la capa de mezcla, sino también las condiciones de irradiación solar, temperatura, humedad relativa, etc., que son diferentes sobre la capa límite atmosférica que bajo ella.

Como resultado, se concluye que la única solución posible al problema de contaminación atmosférica de Santiago, es la drástica disminución en forma permanente de las emisiones primarias (básicamente industriales y generadas por los vehículos motorizados) y secundarias (reciclaje de polvo y otras).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Contrato Universidad de Chile-Servicio de Salud del Ambiente, Región Metropolitana, 1985, "Estudio de caracterizaciones físicas y químicas de partículas en suspensión en la Región Metropolitana". Informe final, 1985.
2. Sandoval H. y Toro P. "Estudio de evaluación de sulfatos en aerosoles de Santiago" Intendencia Región Metropolitana. Desarrollado por Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile 1989-1990.
3. Rojas C., Artaxo P., and Van Grieken R. "Aerosols in Santiago de Chile: A study using receptor modeling with X-ray fluorescence and single particle analysis". *Atmospheric Environ.* **24B**, 227-248, 1990.
4. Préndez M., Ortiz J., and Zolezzi S. Informe final proyecto Fondecyt 0167/88, 1991.
5. De la Vega V., Fuentes H., Ortiz J. y Préndez M. "Balance de masa en aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile". *Bol. Soc. Chil. Quím.* **32**, 187-197, 1987.
6. De la Vega, Viviana "Contaminación por iones inorgánicos en los aerosoles atmosféricos del Área Metropolitana". Tesis de Licenciatura en Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile, 1986.
7. Campos, Cecilia "Influencia de algunos iones inorgánicos en los aerosoles atmosféricos de la ciudad de Santiago, sobre y bajo la capa de inversión térmica". Tesis Químico. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile, 1991.
8. Chock D.P., and Heuss J.M. "Urban  $O_3$  and its precursors, reliable measurements and robust statistics are prerequisites for more effective  $O_3$  control". *Environ. Science & Technology* **21**, 1146-1153, 1987.
9. Liplert, F.W., Morris S.C., and Wyzga R.E. "Acid aerosols. The next criteria air pollutant". *Environ. Science & Technol.* **23**, 1316-1322, 1989.
10. Paur R.J., Baumgardner R. E., Anoja V.P., Claiborn C.S. and Bradow R.I. "Dynamics chemical characterization of mountain clouds" *Atmospheric Environmental* **24A**, 563-572, 1990.
11. Informe de Contaminación Atmosférica, año 1991, Servicio de Salud del Ambiente, Región Metropolitana.
12. Estudios específicos de descontaminación ambiental, "Desarrollo de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos", Intendencia Región Metropolitana-ENSR (ex-ERT)-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile-Intec, Chile, Préstamo B.I.D. 469/OC-CH, 1990.
13. Report AP42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, USEPA, 1988.
14. Strauss W. and Mainwaring S. J. "Contaminación del Aire: Causas, efectos y soluciones" Ed. Trillas, 1990.
15. Eatough D., Arthur R., Eatough N., Hill M., Mangelson N., Richter B. and Hansen L. "Rapid conversion of  $SO_2$  (g) to sulfate in a fog bank". *Environmental Science and Technol.* **18**, 855-860, 1984.
16. Cheng L., Peake E. and Doyis A. "The rate of  $SO_2$  to sulfate particle formation in the air parcel from an Oil sands extraction plant plume". *Journal of Air Pollution Control Assoc.* **37**, (2), 163-167, 1987.
17. Sosaki K., Kurita H., Carmichael G.R., Chang Y.S., Muram K. and Veda H. "Behavior of sulfates, nitrates and other pollutants in the long-range transport of air pollution". *Atmos Environ* **22**, 7, 1301-1308, 1988.
18. Izumi K., Nizuuchi M., Yoshioka M., Murano K. and Fubumaya T. "Redetermination of the rate constant for the reaction of OH radicals with  $SO_2$ ". *Environmental Science & Technol.* **18**, 116-118, 1984.
19. Kadowaki S. "On the nature of atmospheric oxidation processes of  $SO_2$  to sulfate and of  $NO_2$  to nitrate on the basis of journal variations of sulfate, nitrate, and other pollutant in a urban area". *Environmental Science & Technol* **20**, 1249-1253, 1986.
20. Oyola, P., Romero, R. "Análisis del estudio sobre la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana de Santiago de Chile" Taller Internacional "Opciones para controlar la Contaminación Atmosférica de Santiago de Chile", Diciembre 2-5, 1992, Santiago, Chile.
21. Ulriksen, P. Informe final proyecto Fondecyt 1182/91, 1992.
22. Martínez, M. y Sandoval, H. "Distribución espacial y temporal de CO y  $SO_2$  en el aire de Santiago de Chile" XIX Congreso Latinoamericano de Química, 5-9 Noviembre, 1990, Libro de resúmenes P1212.
23. Información horaria de contaminantes de la red MACAM. Servicio de Salud del Ambiente. Comunicación privada.
24. Friedlander, S.K.: "Aerosol Dynamics and Gas-to-Particle Conversion" in: "Recent Developments in Aerosol Science", Ed. David T. Shaw, John Wiley & Sons, 1978.
25. Friedlander, S.K. "Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of aerosol behavior". USA: John Wiley & Sons, Inc., 1977.
26. Sosaki K., Kurita H., Carmichael G.R., Chang Y.S., Muram K. and Veda H. "Behavior of sulfates, nitrates and other pollutants in the long-range transport of air pollution". *Atmospheric Environ* **22**, 7, 1301-1308, 1988.
27. Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989. Edit. WMO. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report # 20; I, Ch.1: 1-142.
28. Préndez, M. J. Ortiz, S. Zolezzi, C. Campos y N. Apablaza "Aerosoles atmosféricos de naturaleza inorgánica. Contaminación en Santiago de Chile". *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, **7**(4), 224-237, 1991.
29. Trier, A. & H. Horvath, J. *Aerosol Sci.* **20**: 1197, 1989.
30. Trier, A. & H. Horvath "Atmospheric extinction in the visible" Abstr. I Congreso Iberoamericano del Medio Ambiente Atmosférico. Enero 7-11, Santiago, Chile, 1991.
31. Trier, A. "Observations on inhalable atmospheric particulates in Santiago, Chile". *J. Aerosols Sci.* **15**, 419-421, 1984.
32. Stocker, S.H. & S. L. Seager "Contaminación Ambiental: Contaminación del aire y del agua". Barcelona: Edit. Blume, 1981.



- 33 Baumgärtner, M., A. Remde, E. Bock, and R. Conrad "Release of nitric oxide from building stone into the atmosphere" *Atmospheric Environment* **24B**: 87-92, 1990.
- 34 Bignon, J. "La pollution oxydante. Effets sur la santé" *Pollution Atmosphérique* **120**: 378-382, 1988.
- 35 Brochard, P., J.P. Pairon, J. Bignon "Aérosol et Santé: déposition et épuration des particules inhalées". *Poll. Atm.* **126**: 178-184, 1990.
- 36 Morgan, W.K. "The deposition and clearance of dusts from lungs; their role in the etiology of occupational lung disease". In: Morgan, W.K. & A. Seaton. *Occupational lung diseases*. Philadelphia: Saunders Company, 77-96, 1984.
- 37 Wadden, R. A. & P. A. Scheff "Indoor Air Pollution: Characterization, Prediction & Control" USA: Academic Press Inc., 1983.
- 38 Tanner R.L., B.P. Leaderer, J.D. Spengler "Acidity of the atmospheric aerosols". *Environ. Sci. & Technol.* **15**: 1150-1152, 1981.
- 39 Bennet J.H., Lee E.H. and Hedggestad H.E. "Inhibition of photosynthesis and leaf conductance interaction induced by SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>+NO<sub>2</sub>" *Atmosph. Environ.* **24A**, 557-562, 1990.
- 40 Hileman B. Assistant Editor "Acid precipitation". *Environmental Science & Technol* **15** 10, 1119-1124, 1981.
- 41 Morales, J.R., Dinator, M.I., Llona, F., Romo-Kroeger, C. "Major components of aerosols emitted by the Lonquimay Volcano, Chile" *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, 41724(1), 181-192, 1993.
- 42 Informe de Contaminación Atmosférica, Años 1979 a 1985, Servicio de Salud del Ambiente, Región Metropolitana.
- 43 Sandoval, H. y Martínez, M. "Determinación y comportamiento de las partículas en suspensión y respirables en Santiago de Chile" XIX Congreso Latinoamericano de Química, 5-9 Noviembre. Libro de resúmenes P1221, 1990.
- 44 Préndez, M., J. Ortiz C. y S. Zolezzi C. "Efecto de la capa de inversión térmica sobre la distribución masa-tamaño de los aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile". *Actas I Congreso Iberoamericano, V Congreso Interamericano de Meteorología*. Instituto de Meteorología. Asociación Meteorológica Española. Octubre 1992, p.559 - 563, 1993.
- 45 Kaupinen, E. y Pakkanen, T. "Mass and trace element size distribution of aerosol emitted by a Hospital refuse incinerator" *Atmospheric Environment* **24A**, 423-429, 1990.
- 46 Yamane Y. "Estimate of municipal refuse incinerator combustion to Philadelphia aerosol. I Source analysis". *Atmospheric Environment* **22**, 2411-2418, 1988.
- 47 Ulriksen, P., and Aceituno, P. "Studies of atmospheric pollution in Santiago developed at the Department of Geophysics", University of Chile, *Rev. Geofísica*, **3**, 17-42. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, 1975.
- 48 Riesco, R. "Curso sobre Contaminación Atmosférica". Cap. 3. Dictuc Fac. de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1982.
- 49 Ortiz, J., Zolezzi, S. y Préndez, M.M. "Composición elemental por tamaño de partícula en aerosoles de Santiago: Junio de 1980", *Bol. Soc. Chil. Quím.*, **27** (1), 286-289, 1982.
- 50 Préndez, M., and J. Ortiz "Atmospheric pollution by fractionated particulate matter of Santiago, Chile". *Man & his Ecosystem. Proceed. 8th WOCLEAN*, Eds. L.J. Brasser and W.C. Mulder, Amsterdam, **3**, 575-580, 1989.
- 51 Préndez M., Ortiz J., and Zolezzi S. "Evolution of lead concentrations in the suspended particulate matter of Santiago, Chile: Since 1978". *Environmental Monitoring and Assessment*, **24** (2), 99 - 115, 1993.
- 52 Sandoval H. and Toro E. "Comportamiento estacional de algunas sustancias en las partículas suspendidas en el aire de Santiago de Chile" XVIII Congreso Latinoamericano de Química, XVII Jorn. Chil. Qca. 5-415-O, 379-381, 1988.
- 53 Préndez, M., and J. Ortiz. "Elementary composition of airborne particulate matter of Santiago de Chile". *Proceed. of Vth Internl. Clean Air Congress*. Buenos Aires. Argentina, **1**, 273-277, 1982.
- 54 Ortiz, J. and M. Préndez., "Pollution atmosphérique: le choix des éléments utilisables dans la normalisation des concentrations". *Poll. Atmosph.* **21**, 231-234, 1981.
- 55 Préndez, M., J. Ortiz, E. Cortés, and V. Cassorla "Elemental composition of airborne particulate matter from Santiago City, Chile, 1976". *J. of Air Pollution Control Association*, *JAPCA*, **34**, 54-56, 1984.
- 56 Romo-Kroger, C.M. "Elemental analysis of airborne particulate from three characteristic cities in Chile" For present at the 82nd Annual Meeting & Exhibition, Anaheim, California. June 25-30, 89-15-8, p. 2-12, 1989.
- 57 Morales, J.R. y Romo, C. "Determinación de concentraciones de elementos livianos en aerosoles por emisión X inducida por deuterones" *Nucleotécnica* **3**(5), p.45-53, 1983.
- 58 Romo-Kroger, C., Moreno, M. y Elgueta, D. "Análisis de aerosoles de Santiago durante un período de altos índices de contaminación en el año 1989" III Simposio Nacional de Física Experimental y Aplicada. En: En torno a la física, Número Especial, 383-386, 1989.
- 59 Trier, A. y Silva, C. "Inhalable urban atmospheric particulate matter in a semi-arid climate. The case of Santiago of Chile". *Atmosph. Environ.* **27**: 977, 1987.
- 60 Préndez, M.M., Ortiz, J.L., Cortés, E. y Huerta, R. "Plomo y Bromo en aerosoles atmosféricos de Santiago: Parte I" *Bol. Extr. Soc. Chil. Quím.* **1980**; **25**: 243-245, 1980.
- 61 Fuentes, H., Ortiz, J., Préndez, M. "Contribución al estudio de aerosoles atmosféricos de Santiago colectados por impactación" IV Simposio sobre Contaminación Ambiental orientado al recurso aire, INIA-SEREMI Agricultura **1**, p.18- 20, 1985.
- 62 Préndez, M. y Ortiz, J. "Estimación de la fracción de origen natural en los aerosoles atmosféricos de Santiago de Chile" *Bol. Soc. Chil. Quím.*, **27**(1), 283-285, 1982.
- 63 Gil, L. Cuantificación de hidrocarburos en el material particulado menor de 45 µm. *Comunicación Privada*, 1992.
- 64 Sandoval, H. y Toro, P. "Distribución espacial de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire de Santiago Chile" XIX Congreso Latinoamericano de Química, 5-9 Noviembre. Libro de resúmenes P1222, 1990.

- 65 Rahn, K. "The Chemical Composition of the Atmospheric Aerosol". Technical Report, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Kingston, Rhode Island 02881, 1976.
- 66 Ortiz, J., Préndez, M.M. y Zolezzi, S. "Perfil diario de elementos traza y polvo total en aerosoles atmosféricos de Santiago. I Parte", Bol. Extr. Soc. Chil. Quim., 25 (3), 246-248, 1980.



## CAPITULO 6 EFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS

Roberto Belmar E.

Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de las personas	189
Aspectos generales	190
Factores que agravan o modifican los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana	191
Factores confundentes de los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana	194
Efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud de las personas	197
Efectos de los principales elementos contaminantes atmosféricos sobre la salud	199
Estudios epidemiológicos en la ciudad de Santiago	203
Necesidad de un sistema de vigilancia epidemiológica	208
Referencias bibliográficas	210





## E FECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS

**A**ntes de entrar de lleno a detallar los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de las personas, veremos algunos aspectos generales de la contaminación. Es necesario comprender que diversos contaminantes actúan simultáneamente, dificultando la identificación de la acción que cada uno de ellos ejerce sobre la salud.

Para ello, se deben tener en cuenta los factores que agravan o modifican esos efectos, como el lugar y tiempo de exposición, las características del huésped (edad, sexo, factores fisiológicos, educación, condiciones laborales, etc.). De igual modo, se verán los factores confundentes (temperatura, humedad, hábito de fumar, hiperreactividad, etc.), que deben ser cuidadosamente controlados en el diseño de los estudios epidemiológicos.

Teniendo en cuenta estos factores se podrán analizar los efectos de los contaminantes atmosféricos sobre la salud de los individuos, diferenciándolos en efectos agudos, acumulativos o crónicos, para proponer un modelo epidemiológico de tipo ecológico.

Concluye el Capítulo con la necesidad de desarrollar un Sistema de Vigilancia Epidemiológica de la Contaminación Atmosférica, capaz de generar la información necesaria para definir la relación entre la concentración de contaminantes y los daños a la salud y los diferentes niveles de alerta.

### ■ Roberto Belmar Erpel

*Doctor Epidemiólogo de la Escuela de  
Higiene y Medicina Tropical de Londres.  
Director Técnico del Equipo  
ARA/SEEBLA CONSECOL que realizó  
el estudio Epidemiológico sobre  
"Efectos de la Contaminación  
Atmosférica de la Ciudad de Santiago",  
para la Intendencia Metropolitana  
con apoyo del BID.*

*Profesor de Epidemiología y Medicina  
Social de la Escuela de Medicina  
de Nueva York Albert Einstein.  
Jefe del Depto. de Atención Primaria  
del Ministerio de Salud.*



## ASPECTOS GENERALES

El ser humano está expuesto, en su vida diaria, a diversos contaminantes que se encuentran en el aire, tanto en exteriores como en ambientes cerrados, especialmente en ciudades o localidades cercanas a centros industriales y mineros.

En el caso de los centros urbanos, cada ciudad presenta una contaminación atmosférica diferente, dependiendo del tipo de los contaminantes, de sus concentraciones, de las fuentes fijas y móviles emisoras de gases y partículas, de las variables de tipo climático y de las características topográficas imperantes.

Es reconocida por la literatura universal la influencia que la contaminación atmosférica tiene sobre el deterioro de la salud humana, llegando a episodios críticos que se han descrito en numerosas oportunidades, tales como: en Mosa, Bélgica, en diciembre del año 1920; en Endónora, Pennsylvania, Estados Unidos, en octubre de 1948; en Posa Rica, México, en 1950; y el por todos conocido episodio de Londres, Inglaterra, en 1952, repetido en 1959 (Riveros, 1993). En estos episodios se observaron síntomas respiratorios de tipo irritativo, fenómenos respiratorios de tipo obstructivo y una mortalidad más elevada que los promedios establecidos (Ostros, 1984; Schwartz 1990; Schwartz y Dockery 1992).

De esta manera, con el correr del tiempo, se ha establecido la estrecha relación de la contaminación atmosférica con alteraciones de la función respiratoria, con el transporte de oxígeno en el cuerpo, con enfermedades respiratorias cardiovasculares y dermatológicas y con la presencia de diversos y numerosos casos de cáncer (World Bank, Development and Environment Report 1992).

Estos antecedentes nos permiten inferir que los altos niveles de contaminación atmosférica existentes en la ciudad de Santiago pueden tener efectos negativos sobre la salud de sus habitantes. Los estudios experimentales (Gil 1990), tanto como los epidemiológicos, han asociado la contaminación atmosférica de Santiago a diversas alteraciones en la salud humana (Belmar 1990; Oyánguren 1992).

Sin embargo, es reconocida la dificultad para aislar los diferentes contaminantes de la atmósfera y medir sus efectos específicos sobre la salud. Estos últimos, son generalmente la resultante de la acción de un conjunto de distintos contaminantes, que además pueden llegar a potenciarse entre sí.

Esta acción concitada de los contaminantes hace extremadamente difícil la identificación de la acción específica de un determinado contaminante sobre las personas. A esto debe agregarse la existencia de otros factores que agravan o modifican esos efectos.



## FACTORES QUE AGRAVAN O MODIFICAN LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA SOBRE LA SALUD HUMANA

Considerando que la atmósfera intra-muro y extra-muro, aparte de sus componentes naturales, contiene elementos contaminantes que pueden ser riesgosos para la salud, existen, a su vez, **factores** importantes que agravan o modifican los efectos que esos contaminantes atmosféricos tienen sobre el hombre. Los principales factores a tomar en cuenta son: el lugar de exposición, el tiempo de exposición y las características del huésped.

### EL LUGAR DE EXPOSICION

Sin duda la distribución espacial juega un papel importante en la exposición a los contaminantes ambientales y en los consiguientes efectos sobre la salud humana. Es así como las personas que viven cerca de carreteras o calles de alto tráfico, están más expuestas a contaminantes muy difusibles, como gases y partículas respirables.

Los habitantes que viven en zonas de alta luminosidad y en las laderas de montañas, con escasa vegetación arbórea, están más expuestos a contaminantes de oxidación secundaria.

La topografía urbana juega también un rol relevante en el grado de exposición, ya que la existencia de edificación en altura y calles de alto tráfico tiende a provocar vientos de tipo circular, manteniendo en el lugar a los elementos contaminantes.

Las variables de tipo climático y las características geográficas del ámbito de exposición son, por otra parte, factores fundamentales en la modificación de los efectos que los contaminantes ambientales tienen sobre la salud. Este es el caso de Santiago, donde el fenómeno natural de inversión de las capas térmicas, durante un importante período del año, hace variar en forma dramática las concentraciones de los diferentes elementos contaminantes atmosféricos, sin necesidad de que exista, al mismo tiempo, una variación importante en la cantidad de emisiones de gases y partículas contaminantes. Esta característica de cuenca de Santiago, presenta vientos anabáticos y catabáticos que redistribuyen y homogeneizan las concentraciones de los distintos contaminantes, lo que a su vez facilita la importante generación de oxidantes secundarios (Romero 1989).

### EL TIEMPO DE EXPOSICION

La exposición a los contaminantes ambientales no sólo tiene una expresión a través de eventos críticos, sino también por la permanencia de la misma a dichos elementos. Este fenómeno de exposición crónica es difícil de cuantificar



significativamente, por cuanto el pulmón es el órgano de mayor capacidad adaptativa de la economía humana. Por ejemplo, un estudio de trabajadores expuestos durante años a gases y a partículas respirables, no demostraron alteraciones pulmonares importantes (Lobby 1970; Wagner 1969; Rivero 1993).

Sin embargo, se ha comprobado que exposiciones de más de cinco años a emisiones altas de gases y partículas respirables, han producido efectos acumulativos. El estudio de Euler de los Adventistas del Séptimo Día (que no fuman), demostró que las exposiciones sistemáticas a altos niveles de partículas respirables y a gases, como el  $\text{SO}_2$ , presentan riesgos de desarrollar bronquitis crónica obstructiva en un 18% (Euler 1988).

La exposición prolongada a ciertos hidrocarburos contaminantes de tipo aromático, ha resultado en la posibilidad de desarrollar cáncer al pulmón (Haensel 1992; Speitzer 1983; Gil 1991).

Los estudios efectuados en niños de Santiago establecen que tienen su función respiratoria disminuida, en comparación a niños de una ciudad con menor exposición a contaminantes, como es el caso de Los Andes. Incluso debe mencionarse que, la espirometría de este estudio (medición de los volúmenes de la inspiración y expiración), se efectuó en Santiago en un período en que los niveles de contaminantes estaban bajo los estándares permitidos. Esto demostraría un efecto obstructivo de tipo acumulativo en los niños de Santiago, debido a la exposición crónica a elementos contaminantes de la atmósfera.

Diversos estudios han establecido que las personas permanecen al interior de lugares cerrados entre un 60 y un 80% de su tiempo, siendo la vivienda donde transcurre más de la mitad de ese tiempo (Samet 1987). Es importante considerar, entonces, que la vivienda, los lugares de trabajo y los centros de reunión pública cerrados, presentan una atmósfera que recibe aportes negativos, entre otros, de materiales de construcción, combustibles de uso doméstico, humo de tabaco. Estos contaminantes tienden a permanecer en los ambientes cerrados, jugando un papel de relevancia el grado de ventilación que presentan: ventanas, puertas, sistemas climatizantes.

No es de despreciar la influencia que puede tener el ingreso, a estos lugares cerrados, de contaminantes atmosféricos extra-muros, especialmente en aquellos lugares que se encuentran en las inmediaciones de fuentes emisoras de estos elementos.

#### CARACTERISTICAS DEL HUESPED

Los factores asociados a cada persona pueden determinar importantes modificaciones en los efectos que los contaminantes atmosféricos tienen sobre la salud. Entre ellos, los principales son los que se describen brevemente a continuación.

#### Edad y factores fisiológicos

La edad es un factor que debe tomarse en cuenta en relación a los efectos que la contaminación ambiental puede tener sobre la salud. Así como los lactantes y los pre-escolares tienden a reaccionar más agudamente, favoreciendo la hiperreactividad que se expresa en respuestas de tipo irritativo, como la tos, la sibilancia, ronquera o estridor, síntomas respiratorios nocturnos (despertar con sensación de ahogo) y síndrome de obstrucción bronquial.

Estos fenómenos se expresan no sólo en los niños, sino en todos los seres humanos, siendo especialmente severos en los enfermos crónicos con alteraciones de la estructura íntima pulmonar, lo que disminuye su elasticidad, tales como el enfisema, la fibrosis, la silicosis y tuberculosis con abundante tejido fibroso.

En el caso del adulto mayor, éste también expresa con mayor intensidad los efectos de la exposición a contaminantes atmosféricos, a través de irritación pulmonar (tos, ronquera, sibilancia y síntomas respiratorios nocturnos) y efectos funcionales del componente obstructivo respiratorio.

La edad y los factores fisiológicos del huésped modifican los efectos de los contaminantes atmosféricos, tanto en la fisiología humana normal como en el desarrollo de patologías agudas y crónicas.

#### Sexo

No existen muchos estudios donde se observe que las características de género modifiquen los efectos de los contaminantes ambientales sobre la salud del ser humano. Sin embargo, está demostrado que el hábito de fumar en la mujer, durante el embarazo, tiene efectos negativos sobre la función respiratoria del niño (Fisher 1985).

#### Educación y cultura

No hay estudios que permitan establecer diferencias significativas entre los diferentes niveles de educación alcanzados por la persona. No obstante, los grupos que por convicciones religiosas o de otro tipo, no se exponen a determinados contaminantes atmosféricos, han permitido definir distintos grados de exposición asociados a estos elementos. Tal es el caso establecido en el estudio de los efectos de la contaminación atmosférica sobre los Adventistas del Séptimo Día, que no son fumadores (Euler 1988).

#### Estrato social y características laborales

La contaminación atmosférica, especialmente en ciudades donde existe el fenómeno de inversión térmica, como es el caso de Santiago, con vientos de cuenca anabáticos y catabáticos, se presenta distribuida en toda la cuenca. Ello implica que prácticamente todos los sectores de la ciudad y, por ende, todos los sectores sociales, están expuestos a dicha contaminación. Sin embargo, las diferentes característi-



cas sociales y laborales determinan grupos de riesgo de alta exposición, tales como los suplementeros, vendedores ambulantes, choferes de locomoción colectiva, policía de tránsito y operadores de estaciones de peaje.



## FACTORES CONFUNDENTES DE LOS EFECTOS DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA SOBRE LA SALUD HUMANA

Como se podrá observar más adelante, en este Capítulo, la contaminación atmosférica está asociada a alteraciones funcionales, respuestas irritativas del organismo (tos, roncquera y otros), alteraciones obstructivas respiratorias (asma bronquial), disminución de la inmunidad pulmonar local (asociada al aumento de la neumopatía), aumento de distintos tipos de cáncer, aparición de hipoxia celular (Angor Pectoris e infarto del miocardio), alteraciones psicológicas y neurológicas. En todos estos problemas de salud que están relacionados a la contaminación atmosférica, difícilmente se puede establecer una asociación clara entre los elementos causantes y sus efectos, ya que existen factores que impiden o distorsionan una identificación precisa entre los contaminantes y los problemas de salud causados. Estos factores se denominan **factores de tipo confundente**. Ellos deben ser controlados cuidadosamente en el diseño de los estudios epidemiológicos, de manera de poderlos controlar y establecer así las verdaderas asociaciones entre los elementos contaminantes y los diferentes grados de exposición de las personas a ellos.

Se presenta a continuación una breve descripción de los principales factores confundentes y una exposición resumida de los métodos más usuales para controlar estas variables.

### FACTORES CONFUNDENTES

En los estudios de contaminación atmosférica, los factores confundentes más importantes son los siguientes:

#### Temperatura

Distintas investigaciones han permitido demostrar que la temperatura, especialmente la baja, está asociada a enfermedades respiratorias y cardiovasculares. En aquellas ciudades donde existe el fenómeno de inversión térmica, la influencia de las temperaturas bajas es aún más notoria, por cuanto inciden en el descenso de la capa de inversión térmica, disminuyendo el volumen atmosférico y, por lo tanto, aumentando la concentración de los elementos contaminantes, gases y partículas respirables.

Por otra parte, se ha establecido que el aire frío precipita la bronco-constricción, generando la obstrucción bronquial.

#### Humedad

Este es un factor que modifica la respuesta bronquial constrictiva. Es importante, entonces, controlar el porcentaje de vapor de agua atmosférico en los estudios epidemiológicos.

#### Hábito de fumar

Ha sido demostrado que el hábito de fumar es un factor de la mayor importancia en las enfermedades respiratorias y en el cáncer pulmonar (Fisher 1985). Este hábito en las personas, debe ser controlado en cualquier estudio que tienda a asociar la contaminación atmosférica con alteraciones patológicas (Ostros 1989).

#### Fumador pasivo

No sólo el hábito de fumar está asociado a las patologías, sino también la exposición al humo del tabaco a que están sometidos los no fumadores en lugares cerrados, tales como la vivienda o lugares públicos o laborales. Este es un factor que también debe ser controlado en los estudios epidemiológicos (Euler 1988; Belmar 1990). Diversos estudios han demostrado que entre el 20 y el 30% de la población adulta tiene el hábito de fumar, y que un 18% de los no fumadores tienen riesgo de desarrollar bronquitis crónica obstructiva en sus lugares de trabajo por presencia de fumadores, y un 14% entre aquellos que viven con fumadores (Euler 1986). Los estudios en Chile han establecido que en el medio urbano, los fumadores llegan hasta un 40% de la población adulta (Belmar 1990). Este fumar pasivo o también llamado "fumador social", es un factor fundamental, no sólo en los aspectos respiratorios, sino también en los riesgos de desarrollo de cáncer pulmonar (Haensel 1982; Spitzer 1983).

#### Combustibles de uso doméstico

Existen estudios nacionales que han establecido que los combustibles domiciliarios, como la leña, el carbón y la parafina, están asociados a la aparición de bronquitis, acceso de asma bronquial y neumopatías (Belmar 1990). El uso de carbón de piedra como combustible doméstico, también se ha asociado a patologías respiratorias (Schwartz 1990). El gas natural, cuando se quema en llama libre intradomiciliariamente en estufas y cocinas, está relacionado a la producción de óxidos de nitrógeno. Todos estos antecedentes indican la importancia de controlar estos elementos contaminantes como variables confundentes en los estudios epidemiológicos.

#### Hiperreactividad bronquial

Se ha podido demostrar que las personas hiperreactivas tienden a presentar el fenómeno de la obstrucción bronquial cuando están expuestas a niveles bajos de contaminantes atmosféricos (Castillejos 1988). Ello ha sido corroborado experimentalmente en los test de hiperreactividad bronquial con meta-colina (Oyarzún 1990).



### Estatura en el niño

En el uso de indicadores fisiológicos respiratorios, como el volumen expiratorio forzado (VEF1), la capacidad vital forzada, VEF25/50 o 70 y el Pick Flow (flujo expiratorio forzado), la estatura del niño es un factor que modifica sustancialmente sus valores básicos (Aranda 1987). Este factor debe ser controlado, entonces, en los diseños epidemiológicos donde se estudien niños.

### Vivienda

Este es un factor confundente en el cual se deben tomar en cuenta distintos elementos y situaciones: ventilación, aislación térmica, temperatura ambiente, grado de hacinamiento, el tiempo de permanencia en la vivienda, si se trata de casa aislada o departamento, dimensiones, número de habitaciones, materiales de construcción, etc.

### Situaciones laborales

Debe tomarse en cuenta que la exposición a contaminantes atmosféricos, como polvos procedentes de faenas industriales, no sólo afectan a los trabajadores de esos ámbitos laborales, sino también a quienes habitan en su hogar, por la posibilidad de que las vestimentas de trabajo sean vehículos de algunos elementos contaminantes.

### Estrato social

El estrato social determina en la mayoría de los casos el tipo de vivienda habitada, el nivel de educación, el sector de la ciudad donde se vive, etc. Ellos pueden ser factores que influyan en el grado de exposición de las personas a los contaminantes atmosféricos.

### MÉTODOS PARA CONTROLAR A LOS FACTORES CONFUNDENTES

Como se indicara anteriormente, es importante que estos factores confundentes sean controlados en los diseños epidemiológicos de los estudios sobre los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud. Los métodos de uso más generalizado son los siguientes:

- El **modelo ecológico** para comparar dos poblaciones que viven en lugares similares, en cuanto a topografía y variables climáticas, pero que tengan diferentes niveles demostrados, cuantitativamente, de contaminación atmosférica, correspondiendo a la población control la exposición mínima a elementos contaminantes.
- El uso del **individuo mismo** como su propio control. En esta modalidad se estudia cada caso en dos situaciones diferentes, en presencia y en ausencia del elemento contaminante cuyo efecto agudo sobre la salud se desea estudiar. Este modelo presenta la limitación de la capacidad acumulativa de los contaminantes atmosféricos.

- La **técnica del pareo**. Consiste en la formación de "parejas" de casos y controles con las variables confundentes que se desea controlar. Por ejemplo, en un estudio espirométrico entre niños de Santiago y Los Andes (ciudad control), se tomó un caso en cada lugar, de las mismas edades y estatura, sin hábitos de fumar, ambos viviendo en hogares donde se utilizaba el mismo combustible para cocinar, en ausencia de fumadores (fumador pasivo), con la misma hiperreactividad. El estudio espirométrico se efectuó al mismo tiempo. Este modelo de pareo o "matching", tiene la ventaja estadística de usar la diferencia de "pareja" para los test de significancia, y no la diferencia de los dos universos, con lo cual se logra una respuesta más poderosa estadísticamente (Belmar 1990).



## EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS SOBRE LA SALUD DE LAS PERSONAS

Se ha podido demostrar, a través de diversos estudios, que los efectos de la contaminación atmosférica pueden clasificarse en efectos agudos, acumulativos y crónicos, dependiendo del grado de exposición y de los factores personales que modifican la acción deletérea de los elementos contaminantes.

### EFFECTOS AGUDOS

Sin duda es sobre estos efectos sobre los cuales más se ha investigado en la literatura especializada. En el aparato respiratorio se ha podido asociar la contaminación atmosférica con la rinitis aguda, faringitis aguda, laringitis aguda y con las afecciones agudas de las vías aéreas superiores. La contaminación atmosférica no es la causa de estas patologías, sino que actúa como factor irritante y disminuye la inmunidad local tisular del epitelio respiratorio (defensas locales del aparato respiratorio). Son los virus y las bacterias los agentes causantes de la enfermedad y los contaminantes atmosféricos son los irritantes y los que disminuyen la resistencia local, permitiendo el desarrollo de estas patologías agudas.

Las personas con hiperreactividad respiratoria, que han llegado a esa condición por distintas causas, manifiestan su hipersensibilidad irritativa frente a contaminantes como el ozono, el  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y las partículas respirables. El resultado de esta acción irritativa es la obstrucción bronquial, el "atrapamiento" del aire a nivel alveolar. Este síndrome es fisiológicamente la constricción del bronquiolo terminal, que hace dificultosa la salida del aire del alvéolo pulmonar. La expresión usual es la incapacidad de eliminar el aire, haciendo que la expiración sea más prolongada y, en casos extremos, deba usarse la musculatura pulmonar accesorio para eliminar el aire. Fisiológicamente disminuye el Volumen Expiratorio Forzado en el



primer segundo de la espiración (VEF1). También se presenta una disminución de la capacidad vital forzada (volumen máximo de aire expirado) y, en general, un alargamiento de la espiración en el tiempo y una disminución de los volúmenes de aire del volumen expiratorio forzado al 25, 50 y 75% (VEF25, VEF50, VEF75). Existe además una disminución del PEF - "Peak Expiratory Flow" (Araña 1988; Oyarzún 1989; Bello 1980; Bronekreef 1989; Rivero 1993).

El efecto agudo de los contaminantes atmosféricos sobre la inmunidad alveolar ha permitido asociar la contaminación atmosférica con la neumopatía. En ningún caso la contaminación ambiental es el factor etiológico. Al disminuir la inmunidad local del alvéolo, se permite la mayor virulencia de los agentes causantes de la neumopatía, por lo tanto, se eleva el riesgo de contraer neumonías, al estar disminuida la capacidad del huésped de prevenir el crecimiento de los gérmenes en el alvéolo. Un estudio en la ciudad de Santiago (Belmar 1990) y otro en Brasil, permitieron asociar la contaminación atmosférica con el aumento de las neumopatías (Penna 1991). El riesgo atribuible a la contaminación atmosférica en Santiago es de un exceso de 45.000 casos en el año 1988 (Belmar 1990).

Aparte de estos efectos irritativos funcionales obstructivos y de disminución local de la inmunidad alveolar, hay que considerar la existencia de factores que tienden a agravar estos efectos, como el hábito de fumar, el fumador pasivo y las ocupaciones que exponen al individuo a sustancias tóxicas al aparato respiratorio (Wynder 1988).

### EFFECTOS ACUMULATIVOS

La exposición prolongada a distintos contaminantes atmosféricos favorece la aparición de problemas de salud. El estudio de Euler ha permitido establecer este fenómeno acumulativo, señalando que la exposición prolongada a partículas respirables y al  $\text{SO}_2$ , facilitan el desarrollo de bronquitis crónica obstructiva (Euler 1988).

La exposición sostenida al plomo ambiental ha resultado en la disminución de la capacidad intelectual de los escolares. Ello se ha demostrado a través de la disminución del cociente intelectual, el déficit psicológico y la baja de rendimiento escolar en niños con niveles elevados de plomo en la dentina (Needleman 1979). Por otra parte, la exposición prolongada al plomo ha demostrado estar asociada al aumento de la presión arterial.

### EFFECTOS CRONICOS

Las alteraciones fisiológicas asociadas a la contaminación atmosférica han determinado la aparición de patologías de tipo crónico. Como ya se mencionó anteriormente, las alteraciones de la fisiología respiratoria demuestran el efecto crónico de tipo obstructivo en niños expuestos a contaminantes atmosféricos (Kagawa y Tayama 1975; Belmar 1990).

Dentro de las patologías crónicas deben considerarse las de tipo maligno asociadas a la contaminación atmosférica. Entre éstas, cabe hacer mención al cáncer broncogénico pulmonar, al mesotelioma y a los cánceres de la piel relacionados al aumento de la radiación solar.



## EFFECTO DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS CONTAMINANTES ATMOSFERICOS SOBRE LA SALUD

Se describen a continuación, en forma resumida, aquellos efectos que tienen los principales elementos de la contaminación atmosférica sobre las personas.

### EFFECTOS AGUDOS Y CRONICOS DE LAS PARTICULAS RESPIRABLES

Para los fines de su estudio, las partículas en suspensión en la atmósfera deben considerarse como aerosoles. Diversos estudios en Santiago han podido demostrar que existen dos tipos de partículas: aquellas que provienen del medio ambiente, sin mediar la acción físico-química del hombre, y aquellas que son el resultado de procesos industriales o de combustiones abiertas o controladas (Préndez 1991).

De acuerdo a esta definición, las partículas antropogénicas son menores de 10 micrones ( $<10\mu$ ), por lo tanto son respirables y además tienen la capacidad de atrapar más luminosidad que las de mayor tamaño. En cambio las partículas geológicas, mayores de 10 micrones ( $>10\mu$ ), tienden a no ser respirables (Préndez 1991).

La respirabilidad de las partículas está, entonces, en función inversa a su tamaño y, las más pequeñas, por otra parte, poseen mayor capacidad de adsorción, lo que les permite adherir a su superficie externa otras sustancias, tales como metales pesados (Pb, Cd, Ni, Al) e hidrocarburos, incluyendo en estos últimos a los de tipo aromático como el benzo-pireno, de conocida capacidad cancerígena (Préndez 1991).

Las partículas menores de 0,5 micrones tienen una mayor capacidad de penetrar el espacio alveolar y una menor posibilidad de ser eliminadas por la limpieza mucociliar (Rivero 1993).

Los mecanismos patogénicos de las partículas se expresan por medio de la disminución de la capacidad macrofágica alveolar y del aparato bronquial pequeño, y por la introducción de agentes deletéreos debido a su capacidad de adsorción (Préndez 1991; Rivero 1993).

Las partículas respirables, además de alterar por sí mismas la función macrofágica y de sobresaturar la capacidad de limpieza mucociliar, presentan la misma característica de los aerosoles provenientes de los motores diesel, con todos los riesgos de los hidrocarburos aromáticos, como los benzo-pirenos, y su capacidad cancerogénica (EPA 1985).

Todos estos factores patogénicos hacen que las partículas respirables estén



asociadas a los fenómenos irritativos, como la tos crónica, la ronquera, los síntomas respiratorios nocturnos (Belmar 1990). Algunos estudios han asociado a las partículas respirables con el incremento de las neumopatías (Belmar 1990; Penna y Duchiae 1991).

Se ha relacionado también a las partículas respirables con la bronquitis y el acceso de asma bronquial (Rivero 1993; Ostros 1984). El estudio del Banco Mundial "World Development Report", establece que es posible relacionar los altos niveles de presencia de partículas respirables en ciudades del mundo en desarrollo, hasta con un 5% de las muertes (World Bank 1992).

### EFFECTOS AGUDOS Y CRONICOS ASOCIADOS A LOS DERIVADOS DEL AZUFRE

En diversos estudios, los derivados del azufre han demostrado tener capacidad irritativa y de desarrollo de obstrucción bronquial, especialmente aquellos productos más oxigenados ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

Se les relaciona además al aumento de la mortalidad por enfermedades respiratorias (Episodios de Londres y de Donora, Pennsylvania). El papel que desempeñan los derivados del azufre en las enfermedades respiratorias es uno de los más documentados en salud, existiendo muchos estudios epidemiológicos que avalan esta asociación con irritaciones, obstrucción bronquial, morbilidad inespecífica y mortalidad (Schwartz, Ware, Euler, Kagowa, Rivero, Douglas, Romieu y Finkelman, Cohen, Tseng, etc.). No obstante, es importante recalcar que en la mayoría de estos estudios se dio la relación con partículas respirables provenientes de las emisiones de motores diesel (PST), lo que sugiere una acción de sinergismo de las capacidades patogénicas de ambos elementos contaminantes (Belmar 1990; Rivero 1993).

Aparte de estos estudios, se ha establecido que la exposición prolongada, especialmente la ocupacional, a los derivados del azufre, aumenta el riesgo de desarrollo de conjuntivitis agudas y crónicas (Rivero 1993).

No ha sido posible asociar a los derivados del azufre con el desarrollo de algún tipo de cáncer (Rivero 1993).

### EFFECTOS AGUDOS Y CRONICOS ASOCIADOS AL NITROGENO

Los efectos de los derivados del nitrógeno, especialmente los más oxidados y, singularmente, el  $\text{NO}_2$ , presentan una intensa acción irritativa sobre la mucosa respiratoria y el epitelio alveolar (Samet 1987). La exposición al  $\text{NO}_2$ , por otra parte, altera la función pulmonar al desarrollar obstrucción bronquial.

El grado de alteración patológica provocada por el  $\text{NO}_2$ , está íntimamente ligado a las concentraciones de este elemento. Al nivel de 0,5 ppm produce hiper-actividad en niños sanos y asmáticos; en niveles de 1 a 3 ppm, produce pérdidas de cilios de la mucosa respiratoria, hiperplasia celular, disminución de la actividad mu-

ciliar y fagocitosis y disminución de la inmunidad local pulmonar; y a niveles mayores de 150 ppm, produce la muerte por daño pulmonar irreversible (Girardi y Aranda 1987).

Dado que el  $\text{NO}_2$  es un contaminante atmosférico intra-muro, como derivado del uso del gas doméstico, algunos estudios indican que una exposición a 0,3 ppm, por 3 horas, durante una semana, aumenta la sintomatología respiratoria en personas asmáticas (Avol 1989).

No existe evidencia comprobada de carcinogenicidad (capacidad de inducir cáncer en los tejidos) del  $\text{NO}_2$  (Rivero 1993).

### EFFECTOS AGUDOS Y CRONICOS ASOCIADOS AL OZONO

Entre los oxidantes fotoquímicos, el ozono actúa preferentemente sobre el aparato respiratorio, produciendo irritación y obstrucción bronquial, pero también irritación ocular y nasal. Provoca además alteración de la función respiratoria tanto en sujetos sanos como asmáticos, expresándose en una disminución significativa de la capacidad vital y del VEF1 (volumen Expiratorio Forzado). Se ha demostrado que, en niveles de 0,3 ppm, produce daños en los bronquiolos respiratorios, en los macrófagos tipo 1 y proliferación de macrófagos del tipo 2 (Aranda 1987). Como efecto de lo anterior, disminuyen las defensas locales pulmonares.

Estas acciones patogénicas relacionan al ozono con la acción irritativa respiratoria, aumento de los ataques de asma bronquial y aparición de neumopatías en exceso, fundamentalmente por disminución de las defensas alveolares (Belmar 1990; Girardi y Aranda 1992). Por ejemplo, el ozono puede dañar las células tipo 1 del aparato respiratorio, inhibe la cadena enzimática respiratoria celular y provoca la alteración de las enzimas lisosomales de los macrófagos alveolares (Rivero 1993; Gardner y Ehrlich 1983).

### EFFECTOS DEL MONOXIDO DE CARBONO

El monóxido de carbono (CO), tiene una altísima afinidad con la hemoglobina, superando al oxígeno en esta característica en 240 veces. La unión del CO con la hemoglobina forma un compuesto que es extraordinariamente estable: la carboxihemoglobina (COHb). Esta permanece en el torrente circulatorio ya que el Oxígeno no tiene la capacidad de desplazar al CO. Se ha podido establecer que la COHb, cuando alcanza un porcentaje elevado en el torrente circulatorio, produce lesiones severas en los órganos de circulación terminal, como el Sistema Nervioso Central y el Miocardio. Cuando tres cuartas partes de la hemoglobina están bloqueadas, ocurre la muerte, y en niveles de baja concentración, entre un 3 y un 7%, tiende a aumentar las patologías de tipo hipoxia coronaria, tales como el Angor Pectori y el Infarto de Miocardio (Rivero 1993; OMS, CO Quality Guidelines 1987).

Hay que destacar que el hábito de fumar o tabaquismo, es un factor que aumenta



la COHb, agregando hasta un 5% más de COHb por encima del nivel aportado por el CO de la contaminación atmosférica (EPA, Clean Air Standards Advisory Committee). No existe evidencia que el CO tenga capacidad cancerogénica.

En cuanto a la acción de tipo encefálica, el CO tiende a producir deterioro de las funciones de ideación más fina, disminución del estado de vigilia y de la capacidad perceptiva. Esto es particularmente importante en aquellas personas que están expuestas crónicamente al CO y que desarrollan funciones de responsabilidad pública, como es el caso de los choferes de la locomoción colectiva. Ello permitiría establecer una asociación entre los accidentes del tránsito y la exposición a niveles importantes y prolongados de CO.

La alta difusibilidad del CO permite que este elemento penetre con facilidad en los espacios cerrados, especialmente desde calles o carreteras y caminos de alto tráfico, donde es mayor su emisión.

### EFFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS

Los estudios realizados en Chile han demostrado que gran parte de las partículas respirables, más del 72%, provienen de las emisiones de los motores diesel (PTS). Ello permite inferir que estas partículas son hidrocarburos que no alcanzaron a completar su combustión en este tipo de motores. Esto hace que estas partículas de tipo aerosol, aparte de su acción propiamente tal, conlleven los riesgos de los hidrocarburos.

Los hidrocarburos gaseosos participan en las reacciones fotoquímicas de oxidación, pudiendo oxidarse ellos mismos, generando ácidos, éteres, cetonas y aldehídos. Todos estos compuestos, especialmente las olesinas, participan en el smog fotoquímico, produciendo contaminantes secundarios, tales como los PANs y otras sustancias que tienen acciones de tipo irritativo respiratorio y capacidad de "gatillar" accesos de asma bronquial.

Los hidrocarburos contienen compuestos aromáticos policíclicos, entre ellos el benzo-pireno, con demostrada capacidad cancerogénica (Gil 1991; Gil 1992; Speitzer 1983). La misma característica presenta el benceno, otro producto que se encuentra entre los hidrocarburos.

Un grupo de investigadores pudo demostrar que las partículas de la atmósfera de Santiago inducen cambios importantes en los linfocitos y en la función enzimática celular, lo que conduciría a un importante aumento de aberraciones cromosómicas celulares (Gil 1992).

### EFFECTOS AGUDOS Y CRONICOS DEL PLOMO

Existe un importante número de fuentes de información que establecen que los daños por efectos del plomo se producen en el Sistema Nervioso Central, en la sangre, en la fibra de la musculatura lisa, en el aparato digestivo y en la acción inmuno

dépresora (Rivero 1993). Se ha podido establecer, además, la acción del plomo en el embarazo y en alteraciones de tipo congénito. En niveles de exposición crónica, el plomo puede alterar la memoria en los niños, lo que se expresaría en una disminución de los índices de desarrollo mental (Needleman 1979). Otros estudios han demostrado que la exposición crónica al plomo está relacionada al aumento de la presión arterial (EPA 1987; Needleman y Landrigan 1991).



## ESTUDIOS EPIDEMIOLOGICOS EN LA CIUDAD DE SANTIAGO

En la ciudad de Santiago se han desarrollado diversos estudios tendientes a ponderar los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de la población. El primer estudio sistemático sobre este tema lo realizó Oyanguren, comparando casos de personas con bronquitis crónica en un sector de la ciudad, con habitantes rurales, para establecer el grado de asociación de contaminación atmosférica urbana. Aun cuando este estudio no permitió establecer una relación significativa, sin embargo logró proponer el modelo epidemiológico de tipo ecológico para el estudio de la asociación de los contaminantes atmosféricos con la salud humana (Oyanguren 1972).

En la década de 1980, el equipo de Enfermedades Respiratorias del Hospital González Cortés, presentó una serie de estudios sobre obstrucción bronquial y su relación con la contaminación atmosférica (Girardi 1989; Del Solar 1992).

En los mismos años, un grupo de investigadores estudió en forma experimental los efectos de la contaminación atmosférica sobre el metabolismo celular. Estos estudios permitieron establecer alteraciones enzimáticas que estarían relacionadas al desarrollo de cáncer del aparato respiratorio y a alteraciones cromosómicas. Asimismo, llegaron a determinar, en la contaminación atmosférica de Santiago, el alto contenido de sustancias con capacidad mutagénica y cancerogénica (Gil y Adoni et al 1991 y 1992).

Con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Intendencia de Santiago llevó a cabo una investigación epidemiológica para observar el efecto de la contaminación atmosférica sobre la población. Los objetivos de este estudio fueron tanto el establecimiento de las bases del diseño experimental y el método de funcionamiento de un sistema de vigilancia epidemiológica, como la evaluación de los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud de los habitantes del Área Metropolitana de Santiago. Para ello se estudió la mortalidad, la morbilidad y los efectos de la contaminación atmosférica sobre la población sana de Santiago.



## ESTUDIO DE LA POBLACION SANA

Se evaluó el impacto de la contaminación atmosférica sobre un grupo de escolares sanos, considerando la fisiología respiratoria y sintomatologías relacionadas a la exposición de los contaminantes del aire. Para el estudio se seleccionaron 222 alumnos de cuatro colegios de Santiago y 92 alumnos de dos colegios de Los Andes.

Esta elección de escolares se realizó por la mayor facilidad de seguimiento de la población en estudio y por la baja presencia del hábito de fumar entre ellos. Los niños de ambos grupos de colegios tenían entre 9 y 13 años de edad. Los colegios de Santiago se seleccionaron por su cercanía a una estación del sistema de monitoreo de contaminación atmosférica (MACAM).

El modelo ecológico aplicado a los escolares de Santiago y Los Andes demostró que los estudiantes de Santiago presentaban, con mayor frecuencia que los estudiantes de Los Andes, varios síntomas como tos, ronquera, falta de sueño. El modelo, por otra parte, permitió asociar las diferencias de distintos niveles de contaminantes atmosféricos encontrados en Santiago y en Los Andes, debidamente controladas las variables confundentes (hábito de fumar, fumadores pasivos, diversos combustibles domésticos, hiperreactividad, talla y edad de las personas).

**Tabla N° 6.1:** Porcentaje de síntomas encontrados en Santiago y Los Andes, controladas las variables confundentes

Localidad	Tos	Ronquera	Sint. Resp. nocturnos
Santiago	41,0	13,0	9,0
Los Andes	16,0	1,0	0,4
% Diferencia	25,0	12,0	8,6

Probabilidad  $p < 0,01$

Variables confundentes: hábito de fumar, contaminación intradomiciliaria e hiperreactividad.

Por medio de las medidas espirométricas (volúmenes de la respiración - inspiración y expiración), fue detectada una moderada obstrucción bronquial en los escolares de Santiago, comparados con los de Los Andes. La diferencia del VEF1 entre los pares, utilizando el método del pareo o "matching" (N:120), fue de 4,13% ( $p < 0,01$ ). La diferencia del VEF25 fue de un 5,54%; la del VEF50 de un 13,6%; y la del VEF75 fue de un 9,23%.

## ESTUDIO DE MORBILIDAD

Se analizaron las enfermedades que podrían estar asociadas a la contaminación atmosférica. El estudio se realizó sobre más de 331.000 personas que recurrían a los Servicios de Salud en Santiago y sobre 41.000 personas de Los Andes, utilizada como ciudad control.

Este estudio demostró que las enfermedades respiratorias superiores, las patologías obstructivas y las neumonías, fueron significativamente más frecuentes en Santiago que en Los Andes.

El asma en Santiago presentó un riesgo relativo (RR) significativo de 1,76 (en tasas crudas) y de 1,47 en tasas ajustadas por edad. Igualmente, se identificó a la neumonía con un riesgo relativo significativo de 3,27 en tasas crudas y de 2,77 en las tasas ajustadas entre la población de Santiago y la de Los Andes.

El modelo de exposición del estudio permitió asociar las patologías de la vía aérea superior, obstrucción bronquial y neumonía con la contaminación atmosférica y con las variaciones de temperatura. Esta observación no fue casual, sino asociativa. Por otra parte, los antecedentes existentes demostraron la existencia de una relación entre las enfermedades cardiovasculares y conjuntivitis y la contaminación atmosférica y los factores climáticos.

En la Tabla N° 6.2, se exponen los riesgos que tienen algunos factores confundentes asociados a la contaminación intradomiciliaria.

**Tabla N° 6.2:** Riesgo relativo de neumonía, obstrucción bronquial (SBO), bronquitis aguda y conjuntivitis asociados a combustibles domiciliarios, calefacción, hábito de fumar, fumador pasivo y contaminantes ocupacionales en Santiago, 1988

Patologías	Riesgo relativo	Variables
Neumonía	1,39*	Carbón-madera
Neumonía	1,11	Kerosene
Neumonía	0,78	Fumar
Neumonía	2,06*	Fumador pasivo
Neumonía	0,57	Ocupacional
SBO	1,67*	Carbón-madera
SBO	1,33*	Kerosene
SBO	0,80	Fumar
SBO	0,80	Fumador pasivo
SBO	0,75	Ocupacional
Bronquitis aguda	0,82	Carbón-madera
Bronquitis aguda	0,92	Kerosene
Bronquitis aguda	1,09	Fumar
Bronquitis aguda	0,96	Fumador pasivo
Bronquitis aguda	1,31*	Ocupacional
Conjuntivitis aguda	0,40	Carbón - madera
Conjuntivitis aguda	0,80	Kerosene
Conjuntivitis aguda	1,13*	Fumar
Conjuntivitis aguda	1,05*	Fumador pasivo

\* Significancia  $p = 0,50$

Estos riesgos relativos permitieron asociar a los contaminantes intradomicilia-rios (leña, carbón, kerosene), con neumonía y asma bronquial (SBO). El hábito de fu-mar y los contaminantes ocupacionales, se relacionaron con conjuntivitis aguda y bronquitis aguda respiratoria. Un análisis efectuado del nivel de plomo en la sangre de la población en estudio, determinó un nivel promedio de este elemento de 5,4 ug/dl, en la población de Santiago.

## ESTUDIO DE MORTALIDAD

Se llevó a cabo un estudio retrospectivo de la mortalidad, a través del análisis de certificados de defunción, de manera de determinar las causas de muerte relacio-nadas a la contaminación atmosférica en Santiago, comparándola con el resto del país. Se analizaron 700.000 certificados de defunción, aproximadamente.

Se pudo establecer que en los meses de altos niveles de contaminación atmosférica, como Junio, el promedio es de 5,7 muertes al día, lo que es superior al promedio general de muertes diarias (3,4). En los años de alta contaminación atmosférica, 1979 y 1985, las muertes diarias fueron 9,7 y 9,3 respectivamente, para los mismos meses, estableciéndose un exceso de 120 muertes sobre el promedio en 1979, y de 108 en 1985.

**Tabla N° 6.3:** Correlación de  $SO_2$ ,  $NO_x$  y PTS con mortalidad general en Santiago, en los meses de alta contaminación con  $<300 \text{ mg/m}^3$  de PTS. 1976 - 1985

Antecedentes	Santiago	Resto país
$SO_2$		
Coefficiente correlación (R)	.09727	-0.18136
Probabilidad	.7201	.5015
$NO_x$		
Coefficiente correlación (R)	-0.14878	.27593
Probabilidad	.5824	.30151
PTS		
Coefficiente correlación	.49291	.17084
Probabilidad	.044*	.5121

\* Significativo



Esta información estableció que la mortalidad estaba relacionada con el incremento de partículas totales suspendidas (PTS). Los resultados indican que los habitantes de Santiago estuvieron expuestos a un alto riesgo de muerte, asociado con niveles elevados de contaminantes atmosféricos, comparados con el resto de la población del país. Cabe hacer notar que fue imposible controlar la variable confundente del hábito de fumar.



## NECESIDAD DE UN SISTEMA DE VIGILANCIA EPIDEMIOLOGICA

Las diversas situaciones y componentes que comprende la asociación de la contaminación atmosférica con la salud de las personas, hace necesario el estudio de los efectos sobre la población y poder establecer la relación entre los distintos grados de exposición y los indicadores de salud: síntomas, variables psicológicas, morbilidad y mortalidad.

Los estudios, por lo tanto, se han orientado hacia el establecimiento de esta asociación y hacia la generación de la relación entre los grados de exposición y los efectos en la salud, de manera de lograr niveles de alerta en cuanto a los riesgos de exposición (concentración de distintos contaminantes).

Con esta finalidad, las autoridades de gobierno han priorizado los estudios de desarrollo de un Sistema de Vigilancia Epidemiológica de la Contaminación Atmosférica (SVECA). Este sistema debería ser capaz de generar la información necesaria que defina la asociación entre la concentración de contaminantes y los daños a la salud y los diferentes niveles de alerta (Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM). Bases para un SVECA, 1991).

El Estudio Epidemiológico sobre los Efectos de la Contaminación Atmosférica (Belmar 1990), permitió establecer asociaciones entre la sintomatología respiratoria, alteraciones del VEF1, tasas proporcionales de morbilidad en enfermedades respiratorias (vía aérea superior, asma bronquial y neumopatías) y, aun cuando no en forma significativa, una asociación con mortalidad en enfermedades respiratorias. Esta falta de significancia con mortalidad, se debe a que la variable confundente hábito de fumar, no puede ser controlada, al no existir esta información en los certificados de defunción.

Este estudio, por otra parte, logró desarrollar un modelo para generar información que permita perfeccionar las asociaciones establecidas (Belmar 1988).

Basándose en estos antecedentes y frente a la necesidad de contar con un SVECA, la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, a través de una firma consultora, ha desarrollado un Sistema para la ciudad de Santiago. Este sistema se basa en un modelo semi ecológico de estudios de cohortes, comparando muestras de población de Santiago con la ciudad control de Los Andes. Es necesario, sin embargo, revisar permanentemente las características de la ciudad control, de manera que pueda mantener su condición de tal.

En el SVECA se propone que las partículas respirables (PM10) y el SO<sub>2</sub> sean tratados como variables independientes y genera un modelo epidemiológico para controlar las variables confundentes, tales como contaminación intradomiciliaria, edad, hiperreactividad, factores climáticos, vivienda, hábito de fumar y estatura (S.K. Ecología 1993).

En él se establecen 4 redes centinelas, en función pulmonar y sintomatología respiratoria, morbilidad respiratoria y cardiovascular, niveles sanguíneos de Plomo y mortalidad (S.K. Ecología 1993).



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranda C., Astudillo P., Díaz MS., Molina A., Pozo P., "Correlación entre contaminantes atmosféricos y mortalidad infantil por bronconeumonía. Santiago, 1988". *Enf. Respiratorias Cir. Torac* 1991; (supl) 33.
- Aranda C., Astudillo G., Mancilla P., Caussade S., Girardi G.: "Asociación entre contaminación atmosférica, clima y bronconeumonía en niños de Santiago. Proposición de un Modelo Predictivo". *Rev. Chil Ped.* 1992; 63 (supl): 5.
- Aranda C., Mancilla P., Astudillo P., Girardi G., Caussade S.: "Distribución de las enfermedades respiratorias infantiles y Riesgo Relativo de Bronconeumonía entre Santiago y Los Andes". XXV Congreso Chileno de Enfermedades Respiratorias, Santiago 1992. Libro de resúmenes, pp: 46.
- Aranda C., Belmar R., Bello S., Muñoz M., Sheppard D., Oyarsún M.: "El problema de la contaminación atmosférica en la ciudad de Santiago". *Enf. Resp. Cir. Torac* 1990; 6: 69-78.
- Ara-Seebila-Consecol, Belmar R., et Col., "Estudio epidemiológico sobre efectos de la contaminación atmosférica", Publicación de la Intendencia Regional Metropolitana de Santiago, Chile, 1990.
- Belmar R., Aranda C., Orrego M., Vergara ME., Salinas M., Martínez D.: "Estudio epidemiológico sobre efectos de la Contaminación Atmosférica". Intendencia Regional Metropolitana, Serplac. ARA-SEEBILA-CONSECOL. Informe Final. Diciembre, 1989.
- Belmar E., "Estudio de eficacia del programa de control de la obstrucción respiratoria de los niños en el Consultorio Lo Barnechea en el año 1990", Comunicación de la Facultad de Medicina Universidad de Chile. Julio, 1992.
- Belmar R., "Estudio Epidemiológico sobre efectos de la contaminación atmosférica", Enfoques en Atención Primaria, 1er Semestre, 1991.
- Berkey C., et Col., "Indoor air pollution and pulmonary function growth in pre-adolescent children", *Am. J. Epidemiology*, 123: 250-66, 1985.
- Castillejos M., "Effects of environmental pollution on the health of school children between zones of the metropolitan area of Mexico City". In: Punte, S. & Higoneta, J. (eds), *Environment and quality of life. Mexico City*, Plaza Ibalde: XCollection Urban Development, 1988.
- Castillejos M., Gold D., Dockery D., Tosteson T., Baum T., Speizer F., "Effects of ambient ozone on respiratory function and symptoms in Mexico City school children". *Am. Rev. Resp. Dis.* DOCKERY D.W. et al. Change in pulmonary function in children associated with air pollution episodes. *Journal of the Air Pollution Association*, 23: 937-942, 1982.
- Díaz Mejía G.S. et Al. "Evaluation of respiratory symptoms in a cement-plant district in the Mexican Republic". *Salud Pública de Mexico*, 26: 438-446, 1984.
- E.P.A. "Regulation of fuels and fuels additives: Gasoline lead content; final rule and supplemental notice of proposed Rulemaking". *Federal Register*. 50: 9386-408, 1985.
- Euler G.L. et al. "Chronic obstructive pulmonary disease symptoms effects of long term cumulative exposure to ambient levels of total oxidants and nitrogen dioxide in California Seventh-Day Adventists". *Archives of Environmental Health*, 43: 279-285, 1988.
- Fisher P. et Col. "Indoor air pollution and its effects on pulmonary function of adult non-smoking women". II Assoc. between NO<sub>2</sub> & pulmonary function, *Int. J. Epidemiol.*, 14: 221-226, 1985.
- Gil L., Aonís M., Silva M., Vásquez H., Quiñones L.: "Genotoxicidad de extractos orgánicos obtenidos del material particulado del aire de Santiago de Chile". *Revista chilena de Enfermedades Respiratorias*, Vol. 7, N° 4, 216-222, 1991.
- Gil L., Salazar I., Quiñones L., Irazábal C., Gibson G., Adonis M., "Changes on rat monooxygenase by administration of extracts from urban air particulates", *Journal of Basic and Clinical. Physiology & Pharmacology*. 3, 291, 1992.
- Gil L., Adonis M., Silva M., Quiñones L., Salazar I., "Riesgos para la salud humana por la exposición a contaminantes de alta toxicidad en el aire de Santiago". *Ambiente y Desarrollo*. 64-70, 1991.
- Girardi G., Astudillo P., Mancilla P., Aranda C., Gamboa R.: "3268 Hospitalización Abreviadas en Consultorios. Descripción del Procedimiento". XXV Congreso Chileno de Enfermedades Respiratorias, Santiago, Santiago, 1992. Libro de Resúmenes, pp. 84.
- Haensel W. et Col., "Lung cancer mortality as related to residence and smoking history", *J. Nat. Cancer Inst.*, 28: 947-1001, 1982.
- Iturra P., Guzmán M., Girardi G., González R.: "Neumopatías agudas en el niño menor. Relación con la enfermedad bronquial obstructiva crónica". *Rev. Chil. Pediatr.* 1982; 53: 334-337.
- Kagawa J., Tayama T., "Photochemical air pollution. Its effects on respiratory function of elementary school children". *Arch. Envir. Health*, 30, March, pp. 117-122, 1975.
- Martínez F.: "The sudden infant syndrome and small airway occlusion. Fact and a hypothesis". *Pediatrics* 1991; 87: 190-198.
- MINSAL, "Programa de obstrucción bronquial e Infecciones Respiratorias Agudas a nivel Primario". Comité Técnico de Enfermedades Respiratorias de la Infancia. Departamento de Atención Primaria. Informe Final, 1992; pp. 11.
- Needleman H. "Deficit in psychologic and classroom performance of children with elevated dentine lead levels", *N. Eng. J. Med.*, 300:689-694, 1979.
- Needleman H. & Landrigan P. "The health effects of low level exposure to lead". *Am. Rev. Public Health.*, 2:277-298, 1981.
- Ostro B. "A search for a threshold in the relationship of air pollution to mortality: a reanalysis of data on London mortality". *Environmental Healths Perspectives*, 58:397-399, 1984.
- Oyanguren H. y Cols. "Bronquitis Crónica en un área urbana y una rural de Santiago y su relación con el grado de contaminación atmosférica". *Rev. Med. de Chile*. 100-101, 1972.
- Penna MLF. & Duchiadé MP. "Contaminación del aire y mortalidad infantil por neumonía". *Bol of Saint Panan* 110 (3):199-207, 1991.



- Préndez M., Ortiz J., Zolezzi S., Campos C. & Apablaza N. "Aerosoles de naturaleza inorgánica", Contaminación de Santiago. Rev. Chil. Enf. Resp. 7:224-237, 1991.
- Rivero O., et al. "Contaminación Atmosférica y enfermedad respiratoria", Biblioteca de la Salud, Fondo de cultura económica, 1993.
- Romieu I., Weitzenfeld H. & Finkelman J. "Urban Air Pollution in Latin America & The Caribbean: Health Perspectives". World Health Statistics Quarterly, 43:153, 1990.
- Speitzer F.E. et al. "Respiratory disease rates and pulmonary function in children associated with NO<sub>2</sub> exposure". American Review of Resp. Dis., 121:3-10, 1980.
- Samet J.M. et al. "Health effects and sources of indoor air pollution" (part I). American review of respiratory disease, 136:1486-1508, 1987.
- Schwartz J. & Marcus J. "Mortality and air pollution in London: a time series analysis". American Journal of Epidemiology, 131:185-194, 1990.
- S.K.Ecología. "Sistema de Vigilancia Epidemiológica de los efectos de la Contaminación Atmosférica en Santiago". CEDRM, 1992.
- Silva M., Daher V., Adonis M., Gil L. "Daño cromosómico provocado por agentes carcinogénicos del aire de Santiago". Rev. Soc. Chilena de Cancerología. Vol. 2, N°4 226-230, 1992.
- World Bank. World Development Report 1992: "Development & The Environment". Oxford University Press, 1992.
- Ware J.H. et al. "Effects of ambient sulfur oxides and suspended particles respiratory health of preadolescent children". American Review of Resp. Dis., 133:834-842, 1986.
- Ware J.N. "Effects of ambient SO<sub>2</sub> and PTS on respiratory health and the adolescent children". Am. Rev. Resp. Dis. 127:278-283, 1983.
- World Health Organization. Photochemical oxidants. Geneva WHO, Envir. Health Criteria N°7, 1978.
- World Health Organization. Carbon monoxide. In: "Air quality guidelines for Europe". Copenhagen. WHO Regional Office for Europe. WHO Regional Publications, European Series, N° 23, 1987.
- "Normas Sindromáticas para el manejo de las infecciones Respiratorias Agudas en Nivel Primario". Comité Técnico de Enfermedades Respiratorias de la Infancia. XIV Jornadas Nacionales de Pediatría, Viña del Mar, 1991.



## CAPITULO 7 EMISIONES VEHICULARES Y POLITICAS NORMATIVAS

Ricardo Katz B.  
Alejandro Sáez C.  
Gerd Reinke S.

Emisiones vehiculares y políticas normativas	215
Caracterización del parque	215
Emisiones del parque automotriz	217
Normativa existente y propuesta	231
Referencias bibliográficas	235

■ **Ricardo Katz Bianchi**

Ingeniero Civil, Universidad de Chile.  
M.Sc. Administración Ambiental,  
Universidad de Texas, USA.  
Estudios conducentes al Doctorado  
en Ingeniería Ambiental, Universidad  
de Texas, USA.

Consultor, Director de Gestión  
Ambiental Consultores.

Consultor Comisión Especial de  
Descontaminación de la Región  
Metropolitana (CEDRM), Banco  
Mundial y Banco Interamericano  
de Desarrollo (BID) en políticas  
de control de emisiones.

Coordinador Comisión Medio Ambiente  
del Centro de Estudios Públicos (CEP).  
También es autor del capítulo 9  
de este libro.

■ **Alejandro Sáez Carreño**

Ingeniero Civil Mecánico, Universidad  
Técnica Federico Santa María.  
Doctor en Ingeniería Mecánica,  
Instituto de Termodinámica Aplicada,  
Universidad Técnica Superior  
Aquisgrán, Alemania Federal.  
Profesor, Departamento de Mecánica,  
Universidad Técnica Federico  
Santa María.

■ **Gerd Reinke Schulz**

Ingeniero Ejecución Mecánico,  
Universidad Técnica Federico  
Santa María.  
Diplom-Ingenieur, Rheinisch  
Westfälische Technische Hochschule  
RWTH-Aachen, República Federal  
Alemana.  
Profesor y Director del Departamento  
de Mecánica, Jefe Línea Motores de  
Combustión de la Universidad Técnica  
Federico Santa María, desde 1975.

*R. Katz, agradece la valiosa  
colaboración prestada en la  
redacción de este trabajo por  
la Ingeniero Civil Químico,  
María Ignacia Benítez.*



## EMISIONES VEHICULARES Y POLÍTICAS NORMATIVAS

Los vehículos motorizados corresponden a una de las fuentes emisoras más importantes en Santiago, tanto en lo que respecta a su aporte a las concentraciones de gases como en material particulado respirable. Adicionalmente, el parque vehicular está creciendo a una tasa muy alta, lo que agrava la situación.

En este capítulo se caracteriza al parque vehicular de Santiago, sus emisiones y la normativa existente.



## CARACTERIZACIÓN DEL PARQUE

El parque vehicular en Chile, en 1992, era del orden de 1.300.000 unidades, del cual la Región Metropolitana concentra aproximadamente el 50%.

En el país, para efectos normativos, el parque se divide en vehículos livianos y pesados. En la primera categoría se incluyen todos aquellos vehículos cuyo peso bruto total (GVWR) es menor o igual a 2.700 kgs. Los vehículos pesados, a su vez, son aquellos de GVWR mayor a 2.700 kgs. Esto variará en el transcurso del año 1993, ya que de acuerdo a la proposición normativa que está siendo estudiada, para regular los camiones y vehículos pesados, se considera que aquellos camiones con un peso bruto total entre 2.700 y 3.860 kgs., sean incluidos como vehículos livianos.

Cabe señalar que en nuestro país los vehículos livianos, en su gran mayoría, son con motor ciclo otto (a gasolina). A su vez, los vehículos pesados son vehículos con motor ciclo diesel.



La Tabla N° 7.1, muestra la caracterización del parque vehicular en la Región Metropolitana, en agosto de 1992.

**Tabla N° 7.1:** Caracterización del parque vehicular de la Región Metropolitana (agosto 1992)

<b>Vehículos livianos (GVWR ≤ 2.700 kgs.)</b>	<b>576.660</b>
Vehículos livianos de pasajeros	419.915
Vehículos comerciales livianos	156.745
<b>Vehículos pesados (GVWR &gt; 2.700 kgs.)</b>	<b>45.000 (*)</b>
<b>Total parque Región Metropolitana</b>	<b>621.660</b>

(\*) Cifra estimada a partir del parque de vehículos pesados del año 1990.

Fuente: Elaboración propia.

## VEHICULOS LIVIANOS

Tal como se indicó anteriormente, los vehículos livianos son aquellos cuyo peso bruto total es menor o igual a 2.700 kgs. Esta categoría de vehículos se subdivide a su vez en:

### Vehículos livianos de pasajeros

Corresponden a aquellos destinados principalmente al transporte de pasajeros. De acuerdo a la definición pertenecen a esta categoría: los automóviles y taxis, como también las camionetas livianas o furgones que son derivados de vehículos originalmente diseñados para el transporte de pasajeros (definición del Decreto Supremo 211). Los vehículos livianos de pasajeros constituyen el 73% del parque total de vehículos de dicha categoría. Dentro de ella, los automóviles representan aproximadamente el 80% y los taxis alrededor del 6%.

### Vehículos comerciales livianos

Corresponden a aquellos destinados al transporte de carga o derivados de éstos. Caen en esta categoría las camionetas diseñadas originalmente para el transporte de carga (definición del D.S. 211). Estos vehículos representan el 27% del parque total de vehículos livianos.

## VEHICULOS PESADOS

Los vehículos pesados son todos aquellos cuyo peso bruto es mayor a 2.700 kgs y corresponden a los autobuses, taxibuses y camiones. Los autobuses representan

el 23% del parque total de vehículos pesados, los taxibuses el 15% y los camiones el 62%, respectivamente. El parque de autobuses y taxibuses es todo diesel, principalmente motores Mercedes Benz OM 352 (autobuses), OM 314 (taxibuses) y últimamente OM 366.



## EMISIONES DEL PARQUE AUTOMOTRIZ

[Las emisiones de fuentes móviles se originan en diferentes partes del vehículo. En general, se puede distinguir entre los contaminantes provenientes de los gases de escape y aquellos procedentes de las emanaciones de combustible evaporado (emisiones evaporativas).]

[La composición de los gases de escape varía fuertemente en función de diferentes aspectos, siendo los más relevantes: el combustible utilizado, el diseño del motor, peso del vehículo, condiciones de tránsito y hábitos de conducción. Por otra parte, las emisiones evaporativas tienen que ver con las características del combustible, con el sistema de almacenamiento y manejo de éste en el vehículo y con las condiciones ambientales del lugar de operación.]

[Debido a las características propias de destilación del combustible, las emisiones evaporativas de los motores diesel son considerablemente menores a las de los motores otto.]

[Los motores otto funcionan dentro de un estrecho rango de relación aire/combustible, próximo a la situación químicamente ideal (estequiométrica) para la quema. Dicha proporción garantiza la propagación de la llama que inicia la chispa. Este tipo de motor admite un exceso de hasta un 20% de la cantidad de aire necesaria para la reacción del combustible.]

[Las emisiones características de este tipo de motores son principalmente: monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx). El CO se produce por la combustión incompleta del carbón contenido en el combustible. A mayor volumen de aire por unidad de combustible, se disminuyen las emisiones de este contaminante. Los HC, que incluyen una gran cantidad de compuestos químicos, son el resultado de una combustión incompleta y las emisiones dependen de la mezcla aire-combustible, de la temperatura y otras variables de diseño. Los NOx, a su vez, se forman, generalmente, en condiciones de alta temperatura y presión, con exceso de aire.]

[El motor diesel, con un proceso de combustión totalmente distinto, funciona siempre con exceso de aire, en una proporción por lo menos un 30% superior a la químicamente correcta.] Los motores diesel pueden alcanzar valores hasta diez veces mayor de dilución de combustible.

[Excepto por el material particulado, las emisiones de estos motores por el tubo

de escape (principalmente HC y CO), son bastante más bajas que las de los motores a gasolina. El material particulado emitido por la combustión diesel es de tamaño muy pequeño ( $1,3 \mu\text{m}$  de diámetro como promedio) y está compuesto de hollín, hidrocarburos condensados y compuestos de azufre, entre otros.]

[El mantenimiento del motor es fundamental, dado que la eficiencia del funcionamiento de los motores diesel obedece a la correcta admisión de aire y combustible en la cámara de combustión (cantidad adecuada en el momento exacto). Si esto no es así, se produce un incremento de las emisiones gaseosas y de partículas, que son características casi exclusivas de este tipo de motores.]

### SISTEMAS DE MEDICION DE EMISIONES

La medición de las emisiones de vehículos es un proceso complejo, por cuanto involucra aspectos como el ciclo de operación del vehículo o motor, además de otras variables tales como la influencia de la temperatura en la cantidad de material particulado. Se miden de dos maneras:

- en g/km, es decir se mide la cantidad en masa de contaminante emitido por el tubo de escape, por kilómetro recorrido, en función de un ciclo específico. Estos ciclos tratan de representar las condiciones de marcha de los vehículos en la ciudad. Este proceso se utiliza para determinar los factores de emisión, que representan la cantidad de contaminante emitido en g/km, en promedio, para cada tipo de vehículo y contaminante. En general las normas de homologación utilizan este método.
- volumétricamente, es decir, se determina el porcentaje de contaminante contenido en el volumen de los gases de escape. Se efectúa en ralentí o a distintas revoluciones del motor. Este método no representa las emisiones reales de los vehículos en circulación, ya que no considera carga, además, no determina la masa de contaminante emitido por unidad de distancia recorrida o energía consumida. Se usa generalmente para revisiones técnicas, ya que es un método rápido de chequeo. Generalmente implica que si un vehículo es rechazado no está cumpliendo la norma bajo la cual fue homologado. Por otra parte si el vehículo aprueba, no es garantía de que la cumpla, por lo que el sistema no es confiable. Las normas de homologación se establecen en g/km, para vehículos nuevos. Por lo tanto, para verificar si un vehículo cumple o no con la norma, se requiere de un ensayo sofisticado, de una duración y costo que no permite su utilización como un sistema de revisión rutinaria.

### ESTUDIOS REALIZADOS

Durante los últimos años se han efectuado varios estudios tendientes a determinar el nivel de emisiones del parque vehicular de Santiago. Estos estudios han sido el fruto de una planificación sostenida y adecuada de las autoridades encargadas del

tema ambiental, de acuerdo a las prioridades establecidas para el control de la contaminación atmosférica en la Región Metropolitana.

Uno de los primeros estudios realizados en Santiago (Estudio de caracterización físico-química del material particulado en suspensión en la Región Metropolitana, Servicio de Salud del Ambiente-Universidad de Chile, 1985), indicó que el 70% de las partículas respirables en suspensión (PM 2,5-partículas menores de  $2,5 \mu\text{m}$  que son 100% respirables), presentes en la atmósfera de la ciudad, provenían de los motores diesel. Los vehículos a gasolina tenían una contribución significativamente menor.

La necesidad de conocer el aporte de las distintas fuentes emisoras en las emisiones de los diferentes contaminantes, definió el estudio **Inventario real de emisiones de fuentes fijas y móviles en la Región Metropolitana**, (CADE-IDEPE para la Intendencia de la Región Metropolitana, 1989).

El objetivo de este estudio, en lo que se refiere a las fuentes móviles, fue determinar las emisiones reales del parque vehicular de Santiago, lo que implicaba identificar los factores de emisión apropiados para los vehículos y, en particular, para la locomoción colectiva (vehículos diesel) de la Región Metropolitana.

Para estos efectos, se diseñó y construyó un laboratorio de medición de emisiones vehiculares (UMEVE), en el cual se realizaron 180 mediciones en autos, 225 en taxis y 150 en buses.

Las mediciones consistieron en la determinación del monto de contaminantes emitidos a través del tubo de escape por cada kilómetro recorrido por el vehículo. Para esto, se hace funcionar el vehículo contra un freno dinámico, en condiciones de marcha que imitan las del vehículo en la ciudad. La idea es que la resistencia que pone el freno dinámico a la acción del motor se asemeja estadísticamente a las que realiza el vehículo en la ciudad (es decir, la secuencia de aceleraciones, desaceleraciones, marchas a velocidad constante y funcionamiento en ralentí). Esto es lo que se conoce como ciclo de marcha.

Para los autos y taxis se empleó el procedimiento y ciclo de marcha recomendado por la EPA -Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-, conocido como FTP-75, y para los buses se empleó un ciclo determinado localmente, sobre la base de mediciones realizadas en vehículos de diversas líneas que fueron instrumentadas con microcomputadores que registraban la distancia recorrida y la velocidad del mismo.



La siguiente tabla muestra los factores de emisión obtenidos para los buses de Santiago:

**Tabla N° 7.2:** Factores de emisión y desviación estándar en autobuses y taxibuses (promedio) de Santiago, en g/km.

Contaminante	Factor de emisión g/km	Desviación estándar g/km
PTS	2,27	1,39
NOx	5,29	2,03
CO	6,71	3,46
COV	1,43	0,84
Fracción respirable PTS	2,07	1,39

PTS: partículas totales en suspensión.

CO: monóxido de carbono.

NOx: óxidos de nitrógeno.

COV: compuestos orgánicos volátiles.

Fuente: Inventario real de emisiones de fuentes fijas y móviles en la Región Metropolitana, Intendencia Región Metropolitana, CADE-IDEPE, 1988-1989.

Al respecto, cabe señalar, que las estimaciones sobre los factores de emisión de partículas de los buses de Sao Paulo, Brasil, indican valores de 1 g/km.

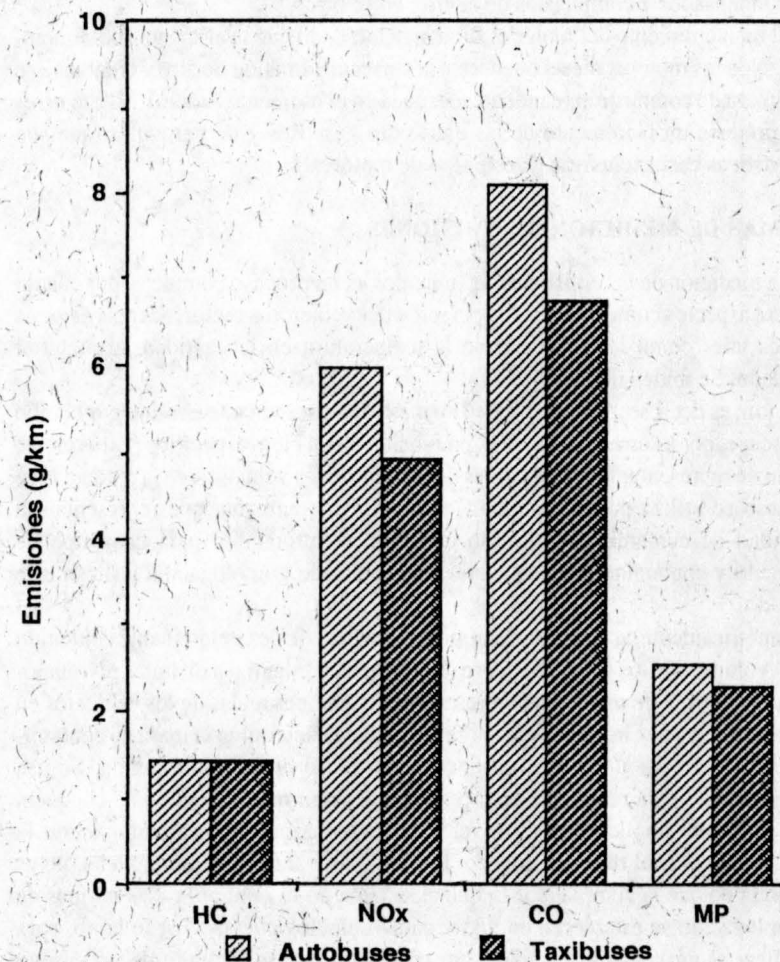
Los factores de emisión para los automóviles y taxis se presentan en la Tabla N° 7.3

**Tabla N° 7.3:** Factores de emisión y desviación estándar en automóviles y taxis de Santiago, en g/km.

Contaminante	Factor de emisión g/km		Desviación estándar g/km	
	autos	taxis	autos	taxis
PTS	0,07	0,08	0,05	0,06
NOx	1,22	1,43	0,74	0,83
CO <sub>2</sub>	6,42	8,06	18,81	18,82
COV	1,05	1,51	0,58	0,61
Fracción respirable PTS	0,06	0,04	0,05	0,03

Fuente: Inventario real de emisiones de fuentes fijas y móviles en la Región Metropolitana, Intendencia Región Metropolitana, CADE-IDEPE, 1988-1989.

En la Figura N° 7.1, se presentan los factores de emisión para los autobuses y taxibuses, obtenidos en el estudio.



**Figura N° 7.1:** Factores de emisión promediados para 150 buses.

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cade-Idepe 1989.

La participación de las fuentes móviles en el total de las emisiones de Santiago se presentan en la Tabla N° 7.4, a continuación.

**Tabla N° 7.4:** Emisiones totales en ton/año y participación de fuentes móviles.

Categoría	Totales en ton/año				
	PTS	SOx	NOx	COV	CO
Emisiones totales	46,830	22,435	12,822	29,001	227,155
Vehículos diesel	1,760	1,948	3,961	1,053	5,426
Vehículos gasolina	902	1,065	7,570	12,958	177,630

Fuente: Inventario real de emisiones de fuentes fijas y móviles en la Región Metropolitana, Intendencia Región Metropolitana, CADE-IDEPE, 1988-1989.

De acuerdo a estos resultados, se concluyó que los vehículos a gasolina eran responsables del 78% de las emisiones de CO, del 59% de las emisiones de NOx y del 45% del COV. A su vez, los vehículos diesel aparecen con una participación muy baja en las emisiones de contaminantes en general.

Aquí cabe señalar que la Tabla N° 7.4, muestra las partículas totales en suspensión. Al analizar la fracción respirable (PM10 - partículas menores de 10 micrones de diámetro): De 10 micrones hacia abajo, se consideran respirables, aumentando hasta el 100% de respirabilidad, en la medida que disminuyen de tamaño), de la cual sólo se hizo una estimación primaria, se concluyó que los vehículos diesel aportaban el 17% de las emisiones de partículas respirables. Esta cifra aumenta al 37%, al considerar el sector céntrico de la ciudad.

Estos resultados no son contradictorios con el estudio anterior, ya que el primero se refiere a partículas 100% respirables (menores a 2.5 micrones), presentes en el aire de Santiago, y este último se refiere a las emisiones de los vehículos diesel de partículas menores de 10 µm.

Esta diferencia entre partículas presentes en el aire y las emisiones de partículas, se produce debido a que las partículas emitidas de menor tamaño permanecen más tiempo en el aire que aquellas de mayor tamaño. [De ahí la importancia de las partículas emitidas por los vehículos diesel, ya que son muy pequeñas, con un tamaño promedio de 1.3 µm de diámetro. Esto se traduce en que la participación de las partículas emitidas por los vehículos diesel en las concentraciones ambientales de material particulado son del orden del 71%]

Sumando lo anterior a que los episodios de exceso de contaminación en la Región Metropolitana son provocados principalmente por las partículas respirables, hizo definir la primera línea de estudios en el área de las fuentes móviles, relacionados con las emisiones de los vehículos diesel, los que para todos los efectos prácticos corresponden a la locomoción colectiva de la ciudad.

Entre 1988 y 1990, la Comisión Nacional de Energía realizó el estudio denominado **Programa Piloto: Uso de Combustibles Alternativos en Vehículos de Locomoción Colectiva Urbana**, cuyo objetivo principal fue la determinación de las emisiones contaminantes producidas por el uso de distintas tecnologías y combustibles alternativos, al igual que la variación temporal de estas emisiones.

El programa piloto tuvo una duración de 6 meses, período en el cual se evaluaron los siguientes combustibles: gas licuado de petróleo, gas natural comprimido, metanol, gasolina sin plomo y diesel, participando un total de 13 buses.

La Tabla N° 7.5, muestra los factores de emisión obtenidos para cada tecnología estudiada. Y a continuación se presenta el listado de los buses, combustibles y tecnologías participantes en el programa piloto.

**Tabla N° 7.5:** Emisiones características de cada tecnología.  
Programa Piloto: uso de combustibles alternativos.

BUS	PTS		CO		NOx		COV		HCHO	
									(Aldehído)	
	Prom	D. Est.	Prom	D. Est.	Prom	D. Est.	Prom	D. Est.	Prom	D. Est.
	g/km		g/km		g/km		g/km		g/km	
A	0.076	0.085	31.543	18.291	11.491	2.330	2.626	0.477	0.0127	0.0
B	0.061	0.038	166.353	56.311	3.727	1.459	6.264	2.453	0.0068	0.0
C	0.047	0.027	115.294	57.143	8.949	4.201	3.617	2.133	0.0050	0.0
D	0.164	0.118	116.438	42.441	4.746	0.805	11.866	2.329	0.0601	0.0
E	0.033	0.041	84.354	10.185	6.059	0.611	6.494	0.429	0.0471	0.0
F	0.154	0.079	16.598	6.897	4.150	1.109	7.227	2.885	0.0328	0.0
G sin filtro	1.621	0.936	3.656	0.277	4.205	0.409	1.291	0.343	0.0029	0.0
G con filtro	0.652	0.179	4.600	0.018	6.005	0.852	1.445	0.108		
G con filtro catalítico	0.385	-	1.796	0.416	3.821	0.224	0.640	0.245		
H	0.705	0.409	2.136	0.298	4.632	0.591	1.422	0.194	0.0016	0.0
I	0.598	0.410	2.556	0.865	4.522	0.551	1.447	0.465	0.0022	0.0
J sin mantención	1.518	0.932	4.606	0.649	7.779	1.588	2.295	0.453		
J con filtro nacional	1.058	0.123	2.880	0.407	5.491	0.200	1.532	0.053	0.0072	0.0
K	0.341	0.083	1.833	0.168	5.362	0.752	0.885	0.105	0.0028	0.0
L	0.195	0.065	2.568	0.703	3.705	0.445	0.842	0.171	0.0003	0.0
M	0.043	0.022	28.976	6.392	7.937	1.390	5.136	3.224	0.0033	0.0

Fuente: Programa piloto: uso de combustibles alternativos en vehículos de locomoción colectiva urbana en Santiago, CNE, 1989.



Lista de buses, combustibles y tecnologías participantes en el programa piloto.

### Combustible

### Tecnología

#### 1. Buses aportados por la Asociación Gremial de Transporte de Pasajeros

##### Gas Licuado de Petróleo

- A. Motor diesel Mercedes Benz (1) transformado a mezcla pobre con encendido por chispa.
- B. Motor otto Chrysler V( 2) adaptado, encendido por chispa.
- C. Motor diesel Deutz (1) transformado en fábrica, refrigerado por aire y con encendido por chispa.

##### Metanol

- D. Motor diesel Mercedes Benz (1) transformado a mezcla pobre con encendido por chispa.
- E. Motor Mercedes Benz (2) con encendido por chispa.

##### Metanol con aditivo

- F. Motor diesel Mercedes Benz (1).
- G. Motor Mercedes Benz (1) con filtro cerámico de partículas con regeneración en el bus.
- H. Motor Mercedes Benz (1) con mantención según catálogo de fábrica.

##### Diesel

- I. Motor Mercedes Benz (1) con mantención según media de Santiago.
- J. Motor Mercedes Benz (1) sin mantención.
- K. Bus testigo Mercedes Benz 1988.

#### 2. Buses aportados por empresas privadas participantes

##### Gasolina sin plomo

- L. Bus nuevo General Motors completo de fábrica, con motor otto, carburador, encendido por chispa y convertidor catalítico.
- M. Bus nuevo Mercedes Benz. a gas natural comprimido.

La Figura N° 7.2, presenta los resultados obtenidos para tres de los buses diesel controlados en el programa piloto, descartado el bus que no contó con control de su mantención.

Para comparar estos valores con los obtenidos en el inventario de emisiones, se estandarizaron los valores de este último, según área frontal y peso del vehículo, lo que permite la comparación. La Tabla N° 7.6, muestra los valores estandarizados del inventario.

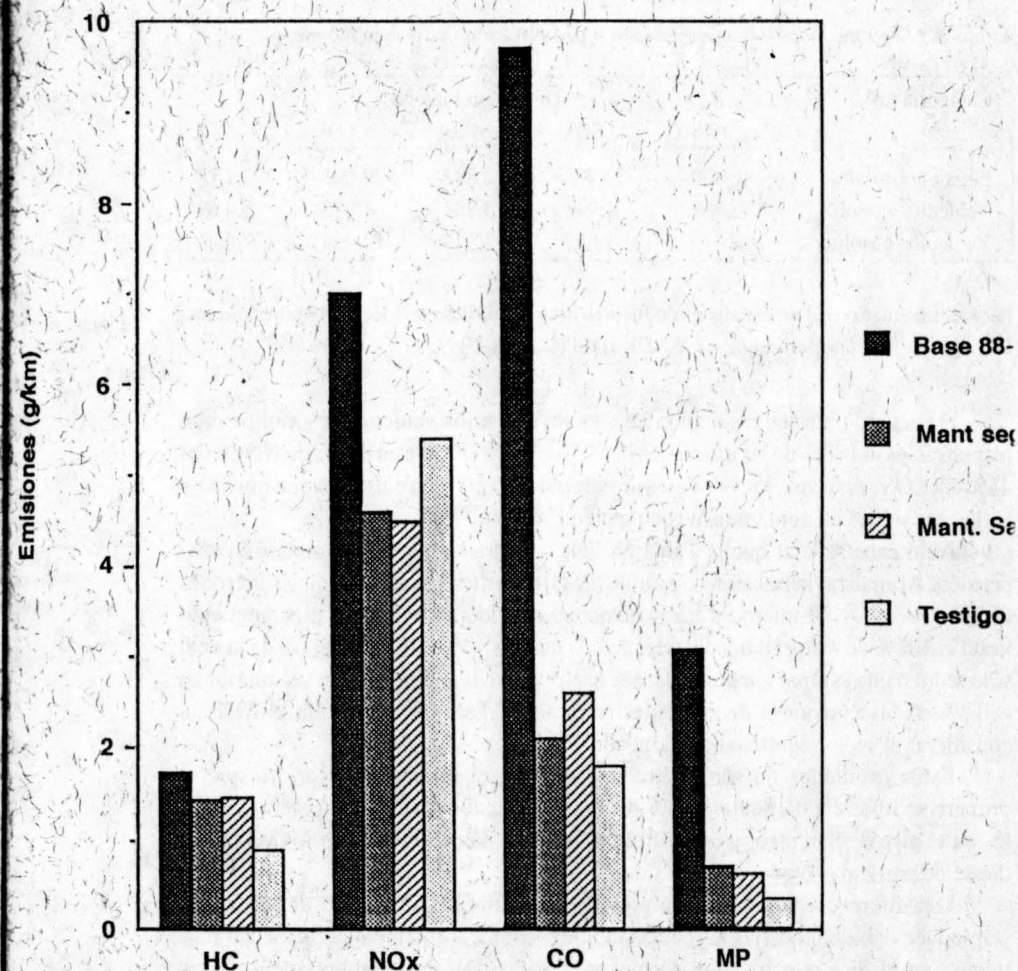


Figura N° 7.2: Factores de Emisión de Buses año 1974 Reacondicionados.

Fuente: elaboración propia.

Tabla N° 7.6: Factores de emisión y desviación estándar en buses de Santiago, en g/km.

Partículas		CO		NOx		COV	
Emisión	D.Est	Emisión	D.Est	Emisión	D.Est	Emisión	D.Est
3,05	1,67	9,66	5,82	7,00	2,26	1,73	0,41

Fuente: Programa Piloto: Uso de Combustibles Alternativos en Vehículos de Locomoción Colectiva Urbana, CNE, 1990.

De la comparación de ambas Tablas se concluye que los factores de emisión promedio para los buses de Santiago son muy superiores a los obtenidos durante el programa piloto.

Los resultados del programa piloto permitieron concluir que todas las tecnologías/combustibles evaluadas, presentaban costos de operación mayores que en los vehículos diesel, siendo el material particulado el único contaminante en el cual las otras tecnologías/combustibles mostraban ventajas significativas con respecto al diesel.

Sin embargo, cabe señalar, que los motores diesel reacondicionados y el bus testigo de la asociación Gremial de Transporte de Pasajeros, mostraron reducciones importantes de emisión de material particulado con respecto a la situación promedio de Santiago. Esto implica que existen potencialidades de reducción de las emisiones en estos motores.

El problema radica en que, de acuerdo al estudio, no existen más de 3.000 buses en Santiago que podrían ser reacondicionados, además de que la calidad del trabajo de reacondicionamiento en el país de los motores OM-352, es deficiente, por lo que se hace necesario emprender labores de capacitación.

El resto de los motores no son aptos para ser transformados para operar con combustibles alternativos, ni para operar con diesel, de manera de alcanzar una base de emisiones igual a la obtenida en el programa piloto.

Paralelamente al programa piloto, surgió la necesidad de evaluar la capacidad de los talleres mecánicos en Santiago, para realizar la mantención adecuada de motores y efectuar reacondicionamientos y eventuales adaptaciones a otros combustibles (Determinación del costo de servicios y calificación de talleres que atienden los motores diesel de los buses y taxibuses de la locomoción colectiva de Santiago, Comisión Nacional de Energía, 1988). Los resultados de la evaluación indicaron que, de los 50 talleres analizados (supuestamente, los mejores existentes), sólo el 16% mostraba un rango de calificación mínimo aceptable para tales efectos. La Tabla N° 7.7, muestra la distribución de los talleres según un rango de calificación que considera los siguientes aspectos: infraestructura física, nivel técnico del personal, equipamiento, volumen de trabajo y perspectivas de desarrollo.

Tabla N° 7.7: Calificación de los talleres de mantención.

Rango de calificación	Número de talleres
0 - 10	1
10 - 20	4
20 - 30	2
30 - 40	11
40 - 50	10
50 - 60	14
60 - 70	5
70 - 80	2
80 - 90	1
90 - 100	0

Fuente: Determinación del costo de servicios y calificación de talleres que atienden los motores diesel de los buses y taxibuses de la locomoción colectiva de Santiago, CNE, 1988.

En la Figura N° 7.3, se grafican los resultados indicados anteriormente.

La siguiente prioridad de reducción de contaminantes en el plan de descontaminación de Santiago, la constituye el monóxido de carbono. Esto determinó la segunda línea de estudios y proyectos que se han realizado.

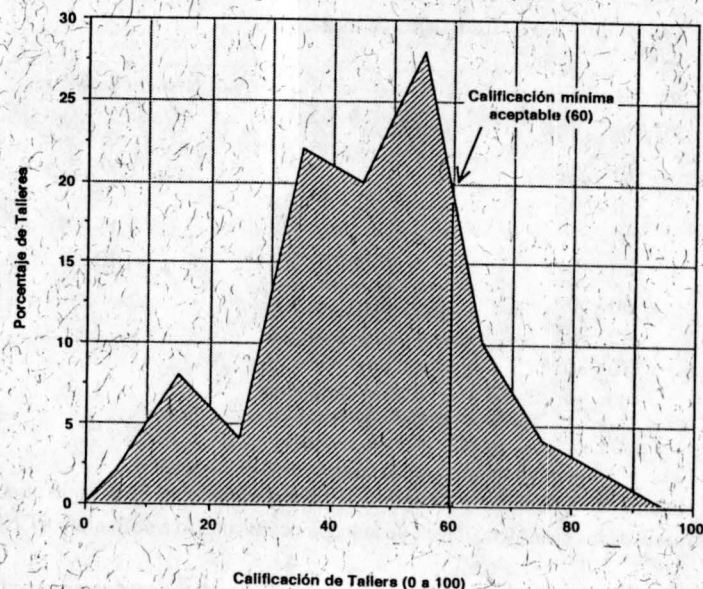
[En esta área la tecnología que se ha desarrollado mundialmente con mayor éxito para la purificación de los gases de escape, es la conversión catalítica. Ella permite oxidar o reducir los gases de escape, producto de la combustión imperfecta. Las reacciones de transformación se producen con mayor rapidez, bajo condiciones térmicas no tan exigentes, si se utilizan sustancias que las aceleran. Estas sustancias son los catalizadores. En la actualidad se utilizan principalmente combinaciones de platino, paladio y rodio.]

[Se pueden distinguir los convertidores catalíticos oxidantes (CCO), de 2 vías. y los convertidores catalíticos oxireductores de 3 vías. En los primeros, con la ayuda de la inyección de aire secundario, se oxida parte del monóxido de carbono (CO) y de los hidrocarburos (HC), transformándolos en dióxido de carbono y agua. Los convertidores catalíticos de 3 vías, reducen los NO<sub>x</sub> y oxidan el CO y los HC.]

[El uso de estos dispositivos requería necesariamente el uso de gasolina sin plomo, que hasta ese momento no estaba disponible en el país.]

Un primer estudio de factibilidad (Estudio de la utilización de convertidores catalíticos en taxis, Comisión Nacional de Energía, 1990), desarrollado en base a información bibliográfica y estudios de mercado, indicaba que, en el mercado, se disponía en principio de convertidores para ser adaptados a vehículos de tecnología tradicional (carburadores), pero que debía diseñarse la ingeniería de detalle para cada tipo de vehículo y motor. [Especialmente crítico resultaba el suministro de aire





**Figura N° 7.3:** Evaluación del nivel tecnológico de Talleres de Reparación de Buses.  
Fuente: elaboración propia.

secundario para la oxidación del CO y de los HC. No se veía posible una adaptación sencilla que incluyera la reducción de los NO<sub>x</sub>, por lo que se recomendaban solamente convertidores oxidantes o de 2 vías.]

La segunda etapa, consistente en el ensayo de 10 diferentes convertidores existentes en el mercado (Desarrollo y ensayo de sistemas convertidores catalíticos, Universidad Técnica Federico Santa María, 1991), realizado con tecnología tradicional en laboratorio, arrojó resultados positivos de reducción de los contaminantes oxidables. De acuerdo a ellos, se podían esperar eficiencias de conversión de contaminantes hasta de un 70% o más para el CO y de un 60% o más para los HC. En general todos los convertidores mostraron eficiencias de conversión similares, especialmente si se disponía de suficiente suministro de aire secundario. En el análisis de operaciones anormales (descarburación, variación del punto de encendido, excesivo consumo de aceite), se descubrió una sensibilidad extrema al excesivo consumo de aceite, el cual disminuía la eficiencia de conversión a menos de un 10%.

Este estudio sirvió de base conceptual para el desarrollo de un programa piloto, en 1991, denominado **Adaptación de convertidores catalíticos oxidantes y dispositivos de reducción de emisiones en taxis usados en Santiago** (Comisión Nacional de Energía, REYSA).

En este programa se adaptaron 40 taxis de diferentes marcas, los que se sometieron a un riguroso seguimiento durante 6 meses. Los resultados globales de este programa se muestran en la Tabla N° 7.8, a continuación.

**Tabla N° 7.8:** Resultados de índices de emisión promedio por tipo de vehículo.

Flota	CO base/CO con convertidor		HC base/HC con convertidor	
	g/km		g/km	
Opala	32,23	17,11	2,18	0,65
Chevette	33,50	12,02	3,33	0,77
Lada	14,34	4,31	2,30	0,50

Fuente: Adaptación de convertidores catalíticos oxidantes y dispositivos de reducción de emisiones en taxis usados en Santiago, CNE, REYSA.

Los valores base corresponden a las emisiones de los vehículos antes de comenzar el programa. Las Figuras 7.4 y 7.5, grafican los resultados obtenidos.

[Para asegurar la obtención de los índices de emisión anteriormente presentados con la tecnología CCO, se concluyó que los vehículos debían cumplir con ciertos requisitos básicos, tales como: el carburador (o sistema de inyección) y sistema de encendido en buen estado; las presiones de compresión, porcentajes de fugas y juego de válvulas de acuerdo a las recomendaciones del fabricante; el consumo de aceite inferior a un litro por cada 1.000 kms. recorridos; uso exclusivo de gasolina sin plomo; evitar el uso excesivo del choke (cebador); someter el sistema a afinamiento periódicos y cambiar el convertidor transcurrido el kilometraje establecido por los fabricantes.]

[La dispersión de los resultados obtenidos en este programa, dentro de una misma familia de vehículos, mostraron que esta tecnología no garantiza una efectividad aceptable para su aplicación masiva.]

[Sin embargo, es una opción atractiva que debiera seguir estudiándose, tanto en sus aspectos técnicos como de fiscalización.]

Este programa derivó en que la normativa actualmente vigente no permite la conversión para los vehículos que no fueron diseñados para el uso de esta tecnología.

## ESTUDIOS Y PROGRAMAS EN EJECUCION

En la actualidad, está en desarrollo un plan piloto (Plan piloto de reducción de emisiones contaminantes en vehículos pesados de uso urbano, Universidad Técnica Federico Santa María, 1993), que tiene por finalidad determinar los niveles máximo de emisión exigibles, tanto para los vehículos pesados nuevos como para los de tecnologías antiguas, considerando la instalación de sistemas de disminución de emisiones post-combustión y otros.

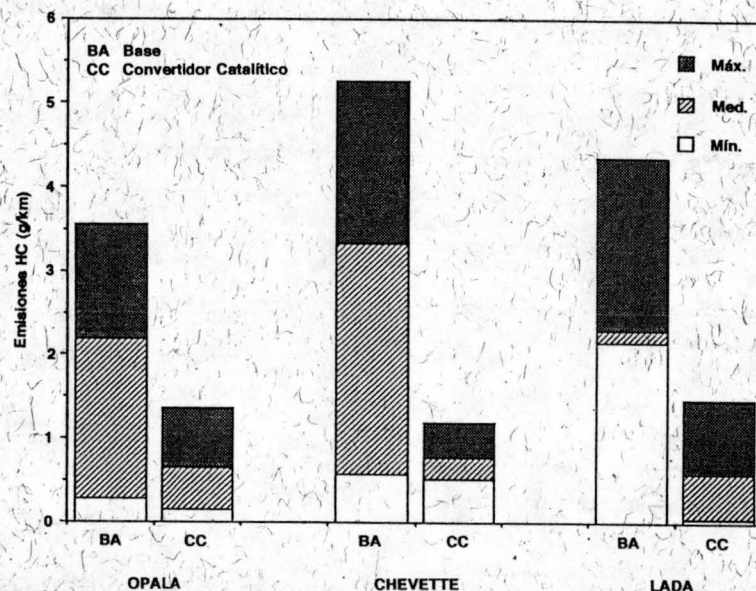


Figura N° 7.4: Índices de emisión de hidrocarburos logrados en adaptación de convertidores con inyección de aire secundario.

Fuente: elaboración propia.

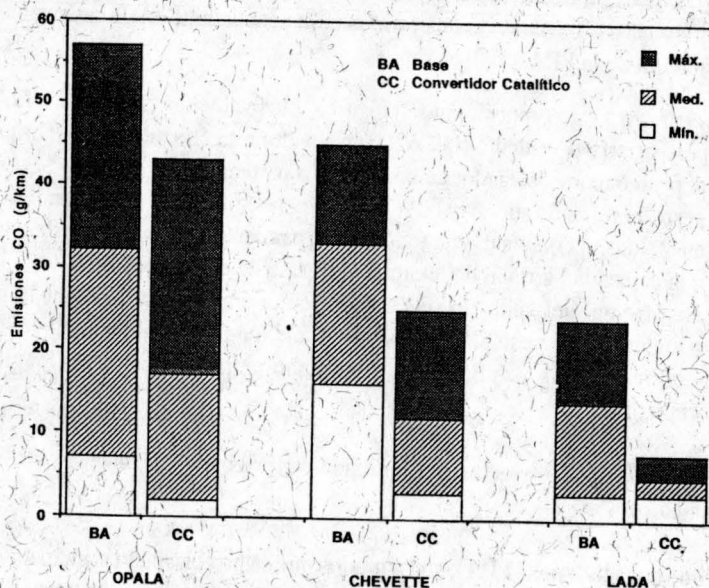


Figura N° 7.5: Índices de emisión de CO logrados en adaptación de convertidores con inyección de aire secundario.

Fuente: elaboración propia.

Asimismo y de acuerdo a las necesidades detectadas en el primer programa piloto, la CEDRM está ejecutando el proyecto **Complementación de la Capacidad Nacional de Investigación, Evaluación, Control y Certificación de Emisiones de Fuentes Móviles**, con los objetivos de construir un centro técnico, capacitar al personal requerido, definir la institucionalidad más apropiada y llevar un control y estadística permanente del sistema completo que sea capaz de evaluar el desarrollo del control de las emisiones vehiculares.

En una primera fase, se diseñó el centro para la fiscalización de las revisiones técnicas de vehículos livianos y pesados. Este permitirá, además, homologar los niveles de emisiones de vehículos livianos y, a futuro, los de motores para vehículos pesados.

La segunda fase, a desarrollarse durante el año 1993, consiste en la construcción del centro y su equipamiento.

Cabe destacar que este centro, contará con un área de capacitación que permitirá entrenar al personal de las plantas de revisión técnica, homogeneizar procedimientos y profesionalizar esta labor. Esto es fundamental para una fiscalización efectiva de las medidas de control de las emisiones de las fuentes móviles.

## NORMATIVA EXISTENTE Y PROPUESTA

El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones es el encargado de establecer la normativa para el control de las emisiones de las fuentes móviles, siendo a su vez la Secretaría Regional Ministerial de Transportes (Seremi de Transportes), la que ejerce la función contralora para el cumplimiento de la normativa.

Los principales decretos actualmente vigentes son: el Decreto Supremo N° 61 y el Decreto Supremo N° 211.

### El Decreto Supremo N° 69

Este decreto establece los niveles máximos de emisión de contaminante evacuados por el tubo de escape de los vehículos motorizados dotados de combustión interna, que operen según el ciclo diesel o según el ciclo otto de dos o cuatro tiempos y los aspectos normativos y técnicos para su control.

Para los vehículos con ciclo otto, establece la medición de:

- monóxido de carbono (CO), como porcentaje máximo en volumen para los distintos combustibles (gasolina y gas licuado de petróleo);
- hidrocarburos (sólo para motores de cuatro tiempos), como emisión máxima de HC en partes por millón (ppm).



En ambos casos, según los años de uso del vehículo, la norma de emisión que se le aplica es: **no se permite la emisión de humo, salvo vapor de agua.**

Para los vehículos con motor ciclo diesel, establece la medición de humo, a través del índice de ennegrecimiento y la opacidad. El índice de ennegrecimiento y la opacidad son métodos para evaluar la cantidad de humo evacuado por el tubo de escape. En el primer caso, se trata de un método reflectométrico que mide el ennegrecimiento de un filtro de papel especial, al pasar un volumen determinado de gases del escape. En el segundo caso, se mide la absorción de la luz, por los gases del escape, por medio de una fuente luminosa y un sensor fotoeléctrico.

El índice máximo o la opacidad máxima permitidos varía de acuerdo a la potencia del motor.

La medición de opacidad es obligatoria para los buses y taxibuses que prestan servicios de locomoción colectiva en la Provincia de Santiago y en las comunas de San Bernardo y Puente Alto.

El decreto también establece las condiciones en que deberán efectuarse las mediciones instrumentales y los métodos oficiales de muestreo y análisis.

El Decreto N° 69, establece normas de emisión para la revisión técnica de los vehículos. No establece normas de homologación.

### El Decreto Supremo N° 211

Establece normas de emisión para los vehículos livianos nuevos, cuya primera inscripción ha sido solicitada a contar del 1° de septiembre de 1992. Los vehículos, a partir de esa fecha, sólo podrán circular en las regiones Metropolitana, Quinta y Sexta si cumplen con las normas de emisión establecidas.

Las normas de emisión a que se refiere el decreto son de dos tipos:

- de homologación en g/km; se establece la medición de: hidrocarburos totales, CO, NOx y partículas (sólo para vehículos diesel); se miden las emisiones por evaporación de hidrocarburos. El sistema de ventilación del cárter no debe emitir gases a la atmósfera.
- para revisión técnica, expresada en forma volumétrica, para efectos de la revisión anual de los gases de los vehículos; se establece la medición de CO, hidrocarburos totales y dióxido de carbono.

La Tabla N° 7.9, muestra un resumen de las normas vigentes para las fuentes móviles.

Tabla N° 7.9: Normas de emisión propuesta para vehículos pesados.

Contaminante	Factor de emisión g/BHP-hr EPA 91	Factor de emisión g/BHP-hr EPA 94
Partículas	0,25 (1)	0,10 (1)
No	5,0	5,0
CO	15,5	15,5
COV	1,3	1,3

(1) Para buses urbanos sería 0,10 en 1994 y 0,05 en 1996.

### PROPOSICION DE NORMAS DE EMISION PARA CAMIONES LIVIANO Y VEHICULOS PESADOS

Los camiones livianos y los vehículos pesados no están considerados en Decreto N° 211, existiendo una proposición actualmente en discusión, basada en normativa de la EPA.

De acuerdo a esta proposición se clasifica a los vehículos según 3 variables:

- peso bruto del vehículo (GVWR): es el valor especificado por el fabricante con el peso máximo cargado, de un vehículo particular.
- peso del vehículo sin carga (CW): es el peso estimado por el fabricante del vehículo en status operacional, con todo el equipamiento estándar, peso del combustible a la capacidad normal del tanque, y el peso de equipo opcional.
- área frontal del vehículo (FA): significa el área circunscrita por la proyección geométrica del vehículo, a lo largo del eje longitudinal, que incluye ruedas pero excluye espejos y deflectores, y un plano perpendicular al eje longitudinal del vehículo.

De acuerdo a estas definiciones se origina la siguiente clasificación de vehículos:

**Camiones livianos (LDT)**, son aquellos que se han diseñado principalmente para transporte de bienes o derivados, o para el transporte de personas, y tienen capacidad para más de 12 personas, o presentan características que los hacen o

rables fuera de carreteras y avenidas. Cumpliendo con las siguientes características técnicas:

GVWR	$\leq 3.860 \text{ kg. y}$
CW	$\leq 2.700 \text{ kg. y}$
FA	$\leq 4,18 \text{ m}^2$

**Camiones livianos pesados (HLDT)**, son aquellos que:

GVWR	$> 2.700 \text{ kg. y}$ $< 3.860 \text{ kg.}$
------	--

**Vehículos Pesados (HDV)**, son aquellos que:

GVWR	$> 3.860 \text{ kg. ó}$
CW	$> 2.700 \text{ kg. ó}$
FA	$> 4,18 \text{ m}^2$

En los vehículos pesados se clasifican también los motores, de acuerdo a lo siguiente:

**Motor - Diesel Pesado (HDDE)**, que se subdividen a su vez en:

- **Motor-Diesel Pesados Livianos** (rango HP: 70 - 170): el tipo de chasis de estos vehículos puede incluir a cualquiera construido a partir de un chasis de camión liviano, se incluyen vehículos recreacionales y otros. Los motores de este grupo corresponden a vehículos con un GVWR mayor a 3.860 kg. y menor a 8.900 kg.
- **Motor-Diesel Pesados Medianos** (rango HP: 170 - 250): el tipo de chasis de los vehículos de este grupo puede incluir a buses escolares, tracto-camiones, pequeños remolques, repartidores interurbanos y pickup, entre otros. Los motores de este grupo son usados en vehículos que tienen un GVWR mayor o igual a 8.900 kg. y menor o igual a 15.000 kg.
- **Motor-Diesel Pesados Pesados** (rango HP: sobre 250): los vehículos que utilizan estos motores son tracto-camiones, camiones y buses utilizados dentro de la ciudad. Los motores de este grupo son usados en vehículos que tienen un GVWR sobre 15.000 kg.

**Motores a gasolina pesados**, que se subdividen a su vez en:

- **Motores-gasolina pesados livianos**: estos motores son usados en vehículos que presentan un GVWR mayor a 3.860 kg. y menor a 6.350 kg.
- **Motores-gasolina pesados pesados**: estos motores son utilizados en vehículos que presentan un GVWR mayor o igual a 6.350 kg.

La proposición de normas según la clasificación de los vehículos considera los siguientes aspectos:

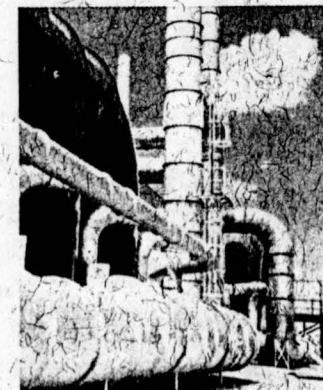
- **para los camiones livianos**, se propone ampliar la clasificación de peso bruto considerada en el D.S. 211 de 2.700 kg hasta 3.860 kg., y aplicarles los mismos niveles de emisión máximos considerados en el decreto mencionado.
- **para los vehículos pesados**, las normas se proponen según el peso del vehículo cargado, pero las mediciones se realizan sobre el motor (gr/bhp-hr). Los niveles de emisión máximos propuestos corresponden a los considerados en EPA 91.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Criterios para normar sobre emisiones vehiculares, Experiencia en Santiago, Chile; Reinke, Sáez y Katz, 1992.
- Universo de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos e inventario real de emisiones para Santiago, Intendencia Región Metropolitana, 1988-1989.
- Los vehículos comerciales y el medio ambiente, Dirección de Desarrollo Ingeniería Experimental Mercedes Benz, 1991.
- Programa Piloto: Uso de combustibles alternativos en vehículos de locomoción colectiva urbana en Santiago, Comisión Nacional de Energía, 1990.
- Programa Piloto: Adaptación de Convertidores Catalíticos Oxidantes y Dispositivos de Reducción de Emisiones en Taxis Usados de Santiago, Comisión Nacional de Energía, 1991.





## **CAPITULO 8** **PRIORIZACION EN LAS ACCIONES DEL CONTROL DE LA** **CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO**

*Juan Escudero O.*

<i>Enfoque general</i>	239
<i>Las prioridades gruesas del plan maestro</i>	240
<i>Distinción entre plan maestro y programa de emergencia</i>	242
<i>Plan específico de rebajas de emisión para fuentes estacionarias</i>	244
<i>Plan específico de reducción de emisiones para fuentes móviles</i>	246
<i>Plan específico de reducción de las emisiones residenciales</i>	252
<i>Plan específico de reducción de las emisiones de polvo natural</i>	253
<i>Planes específicos adicionales</i>	255
<i>La dimensión cultural de la política de descontaminación</i>	257
<i>Conclusiones</i>	258
<i>Referencias bibliográficas</i>	259



## ENFOQUE GENERAL

La contaminación atmosférica de Santiago presenta un nivel de gravedad tal que obliga a intervenciones urgentes. Las concentraciones de contaminantes que prevalecen en la ciudad, están en un rango donde los impactos crónicos sobre la salud humana son aparentes. Por otra parte los niveles a los que se llega durante los episodios, que ocurren frecuentemente en el invierno, han sido asociados con aumentos estadísticamente significativos en las tasas de mortalidad. Finalmente, el creciente conocimiento de la población sobre los hechos anteriores, los ha transformado en una de las principales causas de insatisfacción entre los habitantes de la ciudad.

La preocupación por la temática ambiental es relativamente reciente en Chile. De hecho, la conciencia ciudadana que condujo a formular y poner en marcha el Plan de Descontaminación, surgió al menos una década después que se completaron las caracterizaciones de sus problemas y sus causas. Esta situación tiene dos consecuencias que pesaron fuertemente en el momento de formular el Plan.

La primera es la urgencia, debido a que se empezó a abordar este tema cuando tanto la gravedad objetiva de la situación, como la presión de la opinión pública, eran ya apremiantes. La segunda es que la tardanza en enfrentar los problemas de contaminación permitió la consolidación de una cantidad de situaciones socialmente inaceptables, que constituyen causa visible de una parte importante de los problemas.

Una tercera consideración surge de la realidad institucional de Chile, donde el aparato estatal está organizado en ministerios sectoriales, lo cual hace muy difícil abordar los problemas ambientales que, típicamente, son intersectoriales. La difícil capacidad del Estado para intervenir en esta materia constituye una restricción significativa.

### ■ Juan Escudero Ortúzar

Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Estudios de Postgrado en

Desarrollo Urbano, Universidad Católica.

Master of Science,

Sistema de Transporte,

Massachusetts Institute of Technology.

Profesor Asociado, Departamento

de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.

Secretario Ejecutivo, Comisión Especial de Descontaminación de la Región

Metropolitana.



Por lo tanto, el Plan de Descontaminación de Santiago ha sido diseñado como un instrumento grueso, que pretende obtener rebajas sustanciales en las emisiones de los contaminantes críticos, enfatizando aquellos aspectos donde la transparencia de las causas o la madurez relativa de la realidad político-institucional permiten esperar avances rápidos y decisivos.

Un ejemplo claro de esta manera de enfrentar el problema lo constituye el enfoque seguido frente a las emisiones unitarias de los vehículos de transporte público, tema especialmente sensitivo en este Plan. La discusión actual en los Estados Unidos se centra en la próxima rebaja del estándar de emisión de material particulado, donde se discute una meta de 0,10 ó 0,12 gr/km.. Para lograr esa meta será necesario reemplazar la reciente generación de motores avanzados introducidos en 1991, por nuevos modelos aún no desarrollados que serían alimentados por combustibles que todavía no tienen presencia comercial.

En Santiago, donde los autobuses diesel emiten en promedio alrededor de 2,2 gr/km., se ha formulado un programa de modernización de los sistemas de inspección y mantención, cuya expectativa es lograr una rebaja del orden del 70%. Esta opción ha sido adoptada considerando que su logro requiere costos relativamente bajos con recursos técnicos y humanos disponibles en el país. Pero el argumento más importante, es que constituye una etapa intermedia, indispensable, sobre la cual las opciones de mayor tecnología no tendrán posibilidad de éxito en el futuro y, al mismo tiempo, sin la cual la política no tendría credibilidad ante la opinión pública.



## LAS PRIORIDADES GRUESAS DEL PLAN MAESTRO

Este capítulo ofrece un panorama de las concentraciones de los distintos contaminantes observados en años recientes en Santiago.

Por otra parte, en él se discute el inventario de emisiones, que representa el nivel de conocimientos prevaeciente sobre las causas antrópicas del problema. La Tabla N° 8.1 pretende resumir las combinaciones causa-efecto que constituyen las prioridades del plan maestro. Los problemas críticos, marcados con doble achurado, abren todas las fuentes conocidas de partículas primarias: buses en primer lugar, industrias, calefacción residencial y el polvo natural.

Tabla N° 8.1.

PRIORIDADES DE REDUCCION DE EMISIONES					
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM10
AUTOS	■	■	■		
BUSES			■	■	□
INDUSTRIA				●	□
CALEFACCION					□
POLVO NATURAL					□

■ Necesidad de rebajar emisiones en forma drástica y urgente.  
 □ Necesidad de contener las emisiones y rebajarlas en plazo razonable.

En algunas de estas áreas nuestras concentraciones son varias veces superiores a la norma de calidad del aire y, por lo tanto, es donde se necesita producir rebajas drásticas y urgentes en los niveles de emisión. Tenemos también problemas de monóxido de carbono y ozono y, por ello, se requiere controlar esas emisiones. Pero los límites de excedencia indican que se dispone de algún margen de tiempo, por tanto, el objetivo que se está planteando en este caso, es de contener las emisiones y rebajarlas en un plazo razonable. Son distintas escalas de gravedad y de urgencia, a las que corresponde dedicar distintos niveles de esfuerzo.

En primer lugar, entonces, el plan se centra con mucho énfasis en el logro de rebajas drásticas y urgentes en las emisiones de cada uno de esos cuatro tipos de fuentes de material particulado. En segundo lugar, el plan contempla la adopción de medidas destinadas a contener las emisiones de monóxido y de los precursores del ozono, que afectan principalmente a los vehículos.

Los problemas de dióxido de azufre son más bien puntuales. Hay algunos problemas de SO<sub>2</sub> en el centro de la ciudad, que están asociados principalmente con la circulación de vehículos diesel. Existen también problemas localizados de SO<sub>2</sub> en los alrededores de algunas grandes industrias, en el rango de 4 en toda la ciudad. Por lo tanto, se ha considerado que la manera adecuada de enfrentar este problema es a nivel puntual, no a nivel de la ciudad completa. El Plan de Descontaminación, en su capítulo sobre óxidos de azufre, se refiere al control de las grandes fuentes puntuales y al mejoramiento de la cantidad de combustible diesel.

## DISTINCION ENTRE PLAN MAESTRO Y PROGRAMA DE EMERGENCIA

Desde un comienzo, el plan de descontaminación incluyó dos líneas de acción autónomas: el Plan Maestro de rebajas permanentes de las emisiones, antes descrito, y un Programa de Emergencia. A través de un Decreto Supremo, se determinó la cantidad de medidas de corte selectivo de emisiones que entran en vigencia cuando los índices de contaminación alcanzan determinados niveles. Ese corte selectivo afecta a los vehículos, a los procesos industriales cuyas emisiones tienen mayor concentración y al uso de los combustibles más contaminantes, principalmente carbón y leña.

El Programa de Emergencia descrito en la Tabla N° 8.2, también incluye recomendaciones de limitación de actividad física, especialmente a niños y ancianos.

Tabla N° 8.2.

PROGRAMA DE EMERGENCIA		
	Pre-emergencia (1)	Emergencia (2)
Restricción vehicular	20 - 40%	hasta 60%
Detención de procesos industriales	20%	40%
Restricción uso de combustibles contaminantes	restringido	prohibido
Limitación a la actividad física	recomendado	prescrito

(1) Índices de calidad del aire mayores que 300, equivalente a concentraciones mayores que 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

(2) Índices de calidad del aire mayores que 500, equivalente a concentraciones mayores que 330  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Este plan de emergencia, limita desde el 20% hasta un 40% del transporte, cuando los índices están entre el nivel 300 y 500, así como también un 20% de las emisiones industriales. Cuando los índices superan el nivel 500, se llega hasta un 50% de restricción en el transporte y hasta un 40% de corte en las emisiones industriales. Los límites en los cuales se dan estos cortes aparecen en la Tabla N° 8.2. Todas las emergencias ocurridas ahora han sido por material particulado. Los límites críticos están en 240 y 330 microgramos por metro cúbico de PM10, para los estados de "Pre-emergencia" (índice 300) y "Emergencia" (índice 500), respectivamente.

Este Programa de Emergencia no remedia la contaminación. Es un conjunto de medidas que permite evitar daños graves a la salud de la población, en un momento en que no hay otra opción. Lo que se denomina Plan Maestro de descontaminación, consiste en producir en forma permanente, rebajas suficientes en las emisiones para cumplir con las normas de calidad del aire aun en condiciones atmosféricas desfavorables.

El objetivo global de bajar en forma permanente las emisiones se detalla en un conjunto de planes específicos, para cada uno de los tipos de fuentes emisoras más importantes: principalmente, los cuatro tipos que más aportan material particulado y, en segundo lugar, los contaminantes directamente relacionados con los automóviles.

La Tabla N° 8.3, resume la estructura del Plan, que abarca el ámbito de las emergencias, el de las rebajas permanentes de las emisiones y el mejoramiento de tres funciones del Estado, que son críticas para el éxito del esquema completo: monitoreo de la calidad del aire, programa de salud pública destinado a sanar los efectos de la contaminación aguda, y reforzamiento de la capacidad de fiscalización.

Tabla N° 8.3. ✓

### ESTRUCTURA DEL PLAN MAESTRO DE DESCONTAMINACION ATMOSFERICA

- Plan de monitoreo; ampliar, mantener y reemplazar la red de monitoreo de contaminantes atmosféricos.
- Programa de vigilancia epidemiológica sobre los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana.
- Programa para tratamiento de afecciones respiratorias agudas.
- Planes específicos de rebaja de emisiones para buses, automóviles, industrias, residencias, fuentes de polvo natural, otras fuentes.
- Programa de reforzamiento de los sistemas de fiscalización y control.



Una prioridad absoluta en la implementación del Plan corresponde al mejoramiento de los sistemas de control. La principal debilidad del Estado en esta materia, es que su capacidad de control es extremadamente pobre. En este momento existe la preocupación de multiplicar en varias veces esta capacidad. En realidad, cuando se parte de un nivel tan bajo, es relativamente fácil crecer 400% ó 500%. Sin embargo, lo que se está estructurando ahora con un esfuerzo muy grande para el Estado, es el mínimo creíble como sistema de control.

Para superar la crónica deficiencia de recursos de fiscalización, se ha adoptado una política de recurrir al apoyo de empresas privadas. El sistema de fiscalización ha sido diseñado de manera que las mediciones y auditorías sean realizadas por empresas privadas. El sistema de control estatal va a estar fundamentalmente dedicado a supervisar este sistema de auditorías privadas.



## PLAN ESPECIFICO DE REBAJAS DE EMISION PARA FUENTES ESTACIONARIAS

En el caso de las fuentes fijas, el plan específico de descontaminación apunta a una reducción total del rango del 70% con respecto al inventario inicial. En una primera etapa, se basa en una norma de emisión, la que entró en vigencia el 1° de enero

Tabla N° 8.4.

### PLAN ESPECIFICO DE REBAJAS DE LAS EMISIONES DE FUENTES FIJAS

- Normas de emisión de corto plazo (112 mg/m<sup>3</sup>).
- Metas de reducción adicional de mediano plazo (sistema de compensación).
- Programa de reducción de emisiones de fuentes públicas.
- Desarrollo de sistema de fiscalización.

de 1993. Esta debe ser cumplida, obligatoria y físicamente, por cada una de las fuentes de la ciudad. En una segunda etapa, se exige, en un plazo de cuatro años, una reducción equivalente a la mitad de la concentración prescrita por la norma de corto plazo.

La meta de reducción se plantea en términos de masa y no en términos de concentración. Pero el cálculo se realiza suponiendo que las fuentes existentes mantienen todas sus otras características de emisión y bajan su concentración en un 50%.

Es importante destacar que, mientras la primera rebaja tiene que ser cumplida físicamente, la segunda etapa puede ser lograda, o físicamente, o a través de compensaciones.

El Decreto Supremo 4 del Ministerio de Salud, que oficializó este Plan Específico, abre la posibilidad de que las fuentes se pongan de acuerdo entre sí para cumplir colectivamente la meta de todo un grupo, sin que cada uno de los miembros tenga necesariamente que cumplir la meta propia individualmente. El cumplimiento de la meta de primera etapa, cumple el rol de entrada para poder participar en el juego de la compensación. Para tener derecho a participar, hay que cumplir el requisito inicial, que es haber alcanzado este primer límite que se puede denominar "de decencia".

De la lista de las 100 fuentes más contaminantes de la ciudad, aproximadamente un tercio corresponden a fuentes de propiedad del Estado. Notablemente, entre las más contaminantes están las instalaciones del mismo Ministerio de Salud, incluyendo muchos hospitales que tratan a enfermos por efectos de contaminación. De esa manera, ellos mismos están contribuyendo a que esas personas se enfermen. Hay una instrucción perentoria de solucionar este problema, con los mismos estándares que se le están exigiendo al sector privado. Esto significa una inversión de varios millones de dólares al año, que está ya en proceso.

Paralelamente al desarrollo de la normativa mencionada, la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM) culminó en 1992 la primera fase del proyecto de Desarrollo de la Capacidad Estatal en Control de Emisiones de Fuentes Fijas, que hoy ya está en su fase de ejecución.

La concreción de dicho proyecto radicó en el Servicio de Salud Metropolitano del Ambiente (SSMA), entidad que tiene las facultades para la fiscalización. Es así que se ha desarrollado el Programa de Control de Emisiones de Fuentes Fijas (PROCEFF), dependiente de dicho servicio, estableciéndose un programa conjunto entre el SSMA y la CEDRM, de modo que el primero mantiene todas sus atribuciones de fiscalización contando con la asesoría técnica de la segunda.

El PROCEFF es el organismo que vela por el cumplimiento del D.S. 4 y dentro de sus actividades contempla un programa permanente de capacitación, tanto al sector público en las funciones de control, como al sector privado en los procedimientos de medición de emisiones.

Este programa está también preparando la reglamentación para calificar a los laboratorios de medición y análisis de emisiones, lo cual permitirá una mayor transparencia de información en términos de la calidad de los trabajos ejecutados por ellos, teniendo la facultad a la vez de rechazar la autorización para ofrecer el servicio, o rechazar los informes que detecten errores relativos al procedimiento técnico de medición.

Se tiene así un sistema de control mixto, en el cual son empresas privadas las encargadas de realizar la medición de emisiones, pero supervisadas por la autoridad, en este caso PROCEFF.



## PLAN ESPECÍFICO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES PARA FUENTES MÓVILES

Para la formulación de este Plan Específico se han conceptualizado las emisiones vehiculares totales, como función de: (1) las emisiones unitarias o factor de emisión de cada tipo de vehículo; (2) el grado de uso que se da a esos vehículos en términos de recorrido por unidad de tiempo, y (3) el tamaño de la flota correspondiente. El uso de los vehículos es una materia de transporte y depende de esa política y de la organización del sistema de transporte. Los tamaños de flota dependen fundamentalmente del funcionamiento del mercado automotriz. Esas son materias tan trascendentes como el tema de las emisiones unitarias.

### REESTRUCTURACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Tanto la flota como el uso que se da a los vehículos de transporte público, están fuertemente influenciados por una situación coyuntural que se podría llamar de extrema crisis. Las características de esta situación están resumidas en la Tabla N° 8.5. Hace unos 15 años, el Ministerio de Transporte decretó una política que se llamó de "Libertad de Recorridos". Eso significó la eliminación de todas las barreras de entrada y de todos los reglamentos.

Quien quería prestar servicio de transporte público, pudo hacerlo sin necesidad de pedir alguna autorización, hasta el punto que cuando el actual gobierno asumió en 1990, en el Ministerio de Transporte no existía ni una lista de los recorridos activos en ese momento, ni un registro de los vehículos que estaban prestando servicio. Fue necesario reconstruir esos registros de vehículos y de recorridos en los primeros meses de trabajo.

Un sistema de transporte público no puede funcionar sin gestión centralizada. Por lo tanto, durante los 10 años en que la política de "libertad de recorrido" estuvo

Tabla N° 8.5.

#### TRANSPORTE PÚBLICO SITUACIÓN COYUNTURAL

##### Organización tipo cartel:

Manejo de tarifa.

##### Competencia por nivel de servicio:

Frecuencia.

Cobertura.

Llegada al pasajero.

##### Consecuencias:

Flota sobredimensionada.

Sobreproducción de servicios.

Operación caótica.

Mantenimiento descuidado.

en plena vigencia, esa gestión fue asumida directamente por las empresas. Como no había empresas suficientemente poderosas para hacerse cargo del sistema, los casi 7 mil propietarios que existían, se organizaron en un sindicato, cuyo comportamiento económico tuvo las características de un "cartel".

Esta es una estructura económica con reglas conocidas y que son claramente distintas a las del mercado competitivo. Este "cartel" fue capaz de manejar las tarifas, las cuales subieron en forma desmesurada durante el período. Los distintos servicios subieron por un factor que llegó a ser de 2,2 a 2,8 veces en relación a la tarifa inicial, en moneda constante.

Este aumento de las tarifas es el que hizo rentable la entrada de máquinas adicionales y justificó una expansión de la flota, lo que condujo a un exceso de capacidad estimado en 40% a principios del año 1990. La operación del "cartel" logró eliminar efectivamente la competencia por tarifa. En cambio, las reglas adoptadas para hacer posible la prestación de servicios diversos con la misma tarifa, permitieron la competencia por nivel de servicio. Es decir, por frecuencia, cobertura y llegada al pasajero.

Esto significó, no solamente que llegó a existir un exceso de capacidad, si no que llegó a producirse una sobreutilización de los vehículos disponibles. No sólo un exceso de vehículos, sino también un exceso de recorrido medio por vehículo. Básicamente, el resultado fue una regla de operación en la cual cada bus partía a las 6 de la mañana y no se detenía hasta las 11 de la noche, circulando sin interrupciones y sin disminución en la frecuencia para tomar en cuenta las variaciones en la demanda.



En este panorama, ya que se permitía la competencia entre vehículos por llegar al pasajero, el comportamiento vehicular en la calle alcanzó una situación completamente caótica.

Incluso se terminó con todo el diseño de paraderos, hasta el punto en que los buses se detuvieron en cualquier lugar donde fueran solicitados y la cantidad de veces que fuera necesario.

El Ministerio de Transporte del actual gobierno, adoptó una política que se podría llamar de regulación moderada, la que aparece resumida en la Tabla N° 8.6: (1) retiro programado de la flota más antigua, que ha significado que un 20% de los buses más viejos fueran retirados de circulación y comprados a sus propietarios a precio de chatarra; (2) recientemente entró en operación un sistema de "licitación de recorridos", lo cual revierte la situación de libertad de entrada, a una en la cual cada recorrido: (a) está organizado en una empresa formal y, (b) esa empresa formal tiene un contrato con el Estado, que especifica qué ruta es la que va a servir, con qué frecuencia va a trabajar, qué tipos de máquinas va a utilizar y qué tarifa va a cobrar.

Tabla N° 8.6.

#### POLITICA DE TRANSPORTE PUBLICO

##### Transición a regulación moderada:

- Retiro programado de flota antigua (25%).
- Licitación de recorridos.
- Incentivos a la empresarización.
- Incentivo a mejora tecnológica.
- Reiniciación del plan de construcciones del metro.

#### PROGRAMA DE EXIGENCIAS TECNICAS A LOS VEHICULOS

Las emisiones unitarias de los vehículos en uso presentan niveles largamente superiores a lo deseable, principalmente debido al bajo nivel tecnológico de los sistemas de mantención prevalecientes. Esta situación ha sido reconocida por muchos años, lo que llevó en su oportunidad a la creación de un régimen de Revisiones Técnicas periódicas y obligatorias para todos los vehículos. Dicho sistema se basa en

una red de Plantas Revisoras privadas, licenciadas por el Estado a través de un régimen de concesiones.

Tal como se indica en la Tabla N° 8.7, el Sistema de Revisiones Técnicas está siendo mejorado y complementado con nuevas exigencias.

Las plantas privadas no han funcionado adecuadamente en el pasado, de manera

Tabla N° 8.7.

#### EXIGENCIAS TECNICAS A LOS VEHICULOS

- Revisión técnica obligatoria para todo vehículo.
- Rebaja programada en el límite de emisión tolerada (vehículos en uso).
- Normas de emisión para todos los vehículos nuevos.
- Programa piloto sobre tecnologías de control de emisiones vehiculares.

que, como primer paso, se definió un proceso de mejoramiento de esas plantas, con mayores exigencias técnicas en su equipamiento y una supervisión más estricta. En el caso de la revisión técnica de vehículos de transporte público, se adoptó además un calendario de rebajas en el límite de emisiones toleradas.

En una segunda etapa, se ha planteado un reemplazo de las plantas existentes en 1994, fecha en que vencen los contratos de concesión vigentes. Esa coyuntura será aprovechada para reemplazar los métodos de ensayo, adoptando una prueba de opacidad en plena carga para todos los vehículos diesel, así como mediciones de gases en altas y bajas revoluciones para los vehículos de ciclo Otto.

Los límites de emisión exigidos a los distintos tipos de vehículos están siendo determinados empíricamente, en un proceso experimental que ha incluido pruebas de una cantidad apreciable de ofertas tecnológicas para el control de emisiones.

Las emisiones unitarias de los vehículos nuevos han contribuido también a una preocupación prioritaria. El Ministerio de Transportes ha manifestado su voluntad de adoptar normas de emisión para todos los tipos de vehículos, siguiendo los lineamientos de los países más exigentes. Dado que Chile no produce motores y considerando su

política de comercio exterior, estas nuevas normas no implican una adaptación productiva, sino una reorganización de sus flujos de abastecimiento.

Esto permitió llevar a cabo con gran rapidez la implementación de la norma de emisión para vehículos livianos, la cual entró en vigencia en septiembre de 1992, en conjunto con la distribución de gasolina sin plomo en todo el país.

#### FOMENTO A LAS ALTERNATIVAS DE TRANSPORTE NO CONTAMINANTE

Existe una política de fomento a la formalización de las empresas de transporte, la cual se considera una precondition para el éxito de la siguiente etapa que se centra en la aplicación de incentivos a la mejora tecnológica. Esos incentivos están incorporados al sistema de licitación de recorridos. El diseño de ese sistema contempla que las mejoras que se logren en la tecnología van a significar puntaje para las futuras licitaciones.

La política de transporte otorga una prioridad alta al desarrollo de alternativas tecnológicas no contaminantes. Dentro de esta perspectiva, en 1993, comienza la construcción de una nueva línea de metro. Además, después de unos 15 años de ausencia, la ciudad ha vuelto a tener los recorridos de trolleybuses eléctricos, que en 1992 comenzaron nuevamente a funcionar con recorridos experimentales.

#### POLITICA DE TRANSPORTE PRIVADO

El transporte privado ha tenido en la última década una expansión de un 8 a un 10% anual, motivada principalmente por el aumento del ingreso. El país está creciendo a una tasa acelerada, lo cual hace crítico el problema de las externalidades de contaminación.

Esto significa que el costo para la sociedad de cada auto que se incorpora, es bastante mayor que el costo para la persona que lo compra. Las externalidades asociadas a la congestión de tránsito han sido estudiadas desde hace unos setenta años por los economistas de transporte, quienes han demostrado que ellas conducen a una sobre-utilización de las vías.

Además de ese efecto, las externalidades de contaminación y de congestión se expresan en el mercado automotriz, provocando también un sobredimensionamiento de la flota. Estos efectos podrían ser corregidos internalizando las externalidades de contaminación y de congestión. La política adoptada para corregir esta situación aparece resumida en la Tabla N° 8.8.

Tabla N° 8.8.

#### POLITICA DE TRANSPORTE PRIVADO

- Desincentivo a uso de auto (ley de-peajes).
- Gestión de tránsito.
- Plan de Inversión vial.

#### POLITICA DE DESARROLLO URBANO

- Desincentivo a la expansión (P.R.I.S.).
- Nuevos criterios para inversión en vivienda pública.
- Descentralización.

El Estado no tiene en estos momentos atribuciones para hacerlo, pero se ha planteado un proyecto ley al Parlamento que faculte al Estado para instaurar un sistema de peajes, que sería el complemento del plan de inversiones viales y del plan de gestión de tránsito. En este último aspecto, se ha avanzado notablemente en la implementación de un sistema computarizado de control central para todos los semáforos de la ciudad.

Las mismas externalidades que se manifiestan en la flota de autos, se manifiestan en la expansión de la ciudad. Por la misma razón que las vías son sobre-utilizadas y se compran más autos de los socialmente deseables, la ciudad se sobre-expande físicamente. La herramienta básica en este caso es el Plan Regulador Intercomunal y una modificación de los criterios utilizados por el Ministerio de Vivienda para decidir la instalación de las viviendas sociales.

Esto es algo que se empezó a considerar hace muy poco tiempo y, por supuesto, una vez que se perfeccione el uso de estas herramientas, los efectos sólo se pueden esperar en el largo plazo.





## PLAN ESPECIFICO DE REDUCCION DE LAS EMISIONES RESIDENCIALES

El siguiente tipo de fuentes en el Inventario de Emisiones son las residencias, donde el componente más fuerte es la calefacción. Dentro de calefacción, el rubro que contribuye más a las emisiones está representado por la combustión de leña. El consumo total, en la ciudad de Santiago, es superior a las 500 mil toneladas de leña al año, lo cual justifica la preocupación que ha causado este tema. La Tabla N° 8.9, sintetiza las medidas que se están tomando para controlar estas fuentes.

Tabla N° 8.9.

### REGULACION DE EMISIONES RESIDENCIALES

Investigación y desarrollo sobre calefactores a leña.

Norma de emisión a equipos de calefacción residencial.

Proyecto de Ley para facultad de certificar equipos de calefacción.

Prohibición funcionamiento de chimeneas de hogar abierto.

Normas de calidad de combustibles.

Dentro de la institucionalidad actual no hay ningún organismo del Estado con atribuciones para controlar el uso de la madera como combustible. No existe una norma sobre la calidad de la leña, su grado de humedad, su origen o los equipos utilizados para quemarla. Desde hace poco más de un año, está en desarrollo una normativa que cubre los mencionados aspectos. También se ha organizado un programa de mejoramiento de los diseños de los equipos de calefacción a leña que se fabrican en el país, en conjunto con las empresas fabricantes. Esta es una colaboración que ha resultado muy exitosa.

A la vez se ha trabajado en un proyecto de ley destinado a entregarle atribuciones a la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, para controlar la calidad de la leña y certificar los equipos de calefacción. Las chimeneas de hogar abierto están

prohibidas en toda la temporada de invierno y, en el futuro, incluso la construcción de este tipo de chimeneas va a estar sujeta a permisos especiales.



## PLAN ESPECIFICO DE REDUCCION DE LAS EMISIONES DE POLVO NATURAL

El valle de Santiago está ubicado en una región semi-árida, con un nivel de precipitación media en el rango de los 300 milímetros por año, concentrados en los meses de invierno. Prácticamente toda la vegetación existente en el valle es mantenida por riego artificial. Por otra parte, el suelo natural tiene un alto contenido de finos. Ambos factores combinados favorecen las emisiones de polvo a la atmósfera, ocasionalmente por causas naturales en los meses de verano, pero mayormente por el efecto dispersante de los vehículos. Entre las componentes de este fenómeno destacan: las calles sin pavimento; los aportes de polvos y sedimentos a las calles pavimentadas y la emisión directa desde áreas no destinadas al tránsito. El plan específico puesto en práctica para reducir las emisiones de polvo natural, resumido en la Tabla N° 8.10, ataca los principales fenómenos conocidos que contribuyen a este problema.

Tabla N° 8.10.

### CONTROL DE EMISIONES DE POLVO NATURAL

- Programa urbano extraordinario de pavimentación.
- Plan específico de obras complementarias a la pavimentación, drenaje, cambio en criterios de diseño.
- Ordenanzas municipales comunes para la regulación de obras de construcción y reparación.
- Plan de limpieza de la infraestructura vial.
- Reforestación y creación de áreas verdes.

### PLAN EXTRAORDINARIO DE PAVIMENTACION URBANA

Las fuentes de polvo natural de mayor importancia son las calles y caminos sin pavimento. El inventario de estas fuentes, realizado en 1990, reveló la existencia de más de 700 kilómetros de vías no pavimentadas dentro de la ciudad, a lo cual habría que agregar una importante cantidad de vías parcialmente pavimentadas, así como caminos rurales que, por su volumen de tránsito, podrían llegar a tener un aporte significativo sobre la ciudad.

Frente a esta situación, se adoptó la decisión de iniciar de inmediato un programa extraordinario de pavimentos livianos para calles urbanas secundarias, destinado a terminar con el problema en 1995. También se reactivó un programa de reparación de la vialidad principal. En ambos casos, se recurrió a la reprogramación de créditos multilaterales que estaban funcionando con un bajo ritmo de desembolso, sin que ello interfiera con los planes de construcción vial en curso.

### PLAN ESPECIFICO DE ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS A LA PAVIMENTACION

La pavimentación es una respuesta parcial, que debe ser complementada con la prevención de los aportes de polvo, barro, sedimentos y escombros a la superficie de rodado, así como por la limpieza periódica de esas superficies, para evitar que la suciedad que haya llegado a ellas sea triturada y dispersada por los vehículos. Actualmente, sólo cuatro de 36 municipios del Gran Santiago realizan actividades significativas de limpieza vial.

El Plan específico de actividades preventivas complementarias a la pavimentación y de requerimientos de aseo vial está actualmente en elaboración, a través de un contrato de asesoría internacional. Dentro de este ámbito, tiene por supuesto una primordial importancia el drenaje de las aguas lluvia, así como el retiro de los sedimentos arrastrados por las precipitaciones.

### REGULACION DE LAS OBRAS DE CONSTRUCCION

Otra fuente significativa de polvo natural está constituida por las obras públicas menores y la actividad de construcción en general. Los factores más importantes son los escombros derramados o abandonados sobre las vías, así como el barro transferido desde las obras por el tránsito de camiones y maquinarias.

Todas estas actividades están sujetas a regulaciones municipales, que son válidas para cada comuna. Se intenta desarrollar ordenanzas comunes que eviten la competencia entre municipalidades. Actualmente existen algunos municipios que han formulado ordenanzas más estrictas, y ya se han presentado situaciones en las

cuales dos o más municipalidades compiten entre sí por atraer actividades, con resultado de un relajamiento de las exigencias ambientales. Actualmente se trabaja con estos organismos para establecer un régimen con igual nivel de requerimientos ambientales.

### PLAN ESPECIFICO DE FORESTACION

La vegetación ofrece una gama muy amplia de efectos ambientales benéficos, desde producir oxígeno a constituirse en factor de agrado y belleza. Desde el punto de vista estricto del combate a la contaminación atmosférica, cumple dos tipos de funciones especialmente deseables: (1) la restricción de contaminantes por absorción y adsorción en el follaje, y (2) la prevención de procesos de erosión por acción del viento, el agua o de factores antropogénicos. Estas funciones apelan fuertemente a la intuición, debido a lo cual los programas de forestación cuentan con un invaluable apoyo ciudadano.

El Plan Específico de Forestación contempla, para 1993, la plantación de casi un millón y medio de árboles en la ciudad y sus alrededores. Están en construcción un promedio de 4 parques al año, transformando áreas que el plan regulador declara verdes, pero que en la realidad son sitios eriazos y áridos que tienen una contribución significativa a la emisión de polvo. Este es un plan que comenzó en 1992, año en el que se completaron 5 nuevos parques. Para los años siguientes, se proyecta un esfuerzo similar en la parte urbana, complementado por la reforestación de importantes áreas de la precordillera, al este de la ciudad, donde se observa un grave problema de erosión.

## P PLANES ESPECIFICOS ADICIONALES

El Plan maestro formulado en 1990, se basó en el conocimiento prevaleciente de esa época. La observación sistemática del fenómeno, tanto por los equipos de especialistas que se han ido formando, como por una comunidad crecientemente consciente sobre la naturaleza e importancia del problema, han ido poniendo de manifiesto la existencia de nuevos tipos de fuentes cuya contribución podría ser significativa. En este sentido, las próximas etapas del plan incluirán al menos avances en las siguientes direcciones:



## GRANDES FUENTES REMOTAS

En un radio de 100 Km. alrededor de la ciudad, están localizadas tres grandes refinerías de cobre, tres centrales termoeléctricas y algunas otras fuentes importantes. Los fenómenos de transporte de larga distancia no están completamente caracterizados, dada la complejidad del terreno.

Sin embargo, bajo consideraciones de efectos sobre el entorno cercano, se puso en vigencia, recientemente, un nuevo cuerpo reglamentario del Ministerio de Minería, el D.S. 185, que hace de responsabilidad de las "megafuentes" el cumplimiento de las normas de calidad de aire para material particulado y dióxido de azufre, en el respectivo punto de máximo impacto. Esto, en algunos casos, obliga a rebajas significativas en la emisión.

Este reglamento hace también obligatorio el monitoreo de calidad del aire, lo cual producirá antecedentes indispensables para la comprensión de las interacciones a nivel de la cuenca atmosférica.

## APORTES DE CONTAMINANTES DESDE LAS ZONAS AGRÍCOLAS

La región central de Chile tiene una importante actividad agrícola, que incluye fruticultura de exportación, horticultura y cultivos tradicionales tales como maíz, trigo y oleaginosas. Diversas faenas agrícolas han sido identificadas como generadoras de contaminantes atmosféricos. En particular, preocupan el uso del fuego como procedimiento de eliminación de residuos y las quemaduras a cielo abierto para prevención de daños por heladas. En ambos casos se han iniciado programas pilotos de fiscalización y educación.

## CONTAMINANTES SECUNDARIOS

El conocimiento disponible sobre la formación de aerosoles secundarios en la atmósfera de Santiago, es muy incompleto. Los estudios destinados a obtener un panorama más preciso de este fenómeno, están al menos a dos años de entregar resultados válidos.

El Plan de Descontaminación se ha hecho cargo indirectamente de las principales causas teóricas de estos aerosoles: los óxidos de azufre generados por las "megafuentes", sospechosos de transformarse en sulfatos; los óxidos de nitrógeno, generados mayormente por los vehículos, sospechosos de transformarse en nitratos; los compuestos orgánicos volátiles, generados principalmente por los vehículos y la distribución de combustibles asociados a ellos, con respecto a los cuales se postulan reacciones fotoquímicas con los compuestos nitrogenados.

En los dos últimos casos, las normas de emisión adoptadas para los vehículos implican mitigaciones importantes, que al menos contendrán el aumento de las emisiones de correspondientes.

En el caso de las emisiones de óxidos de azufre por "megafuentes", las medidas tomadas por consideraciones locales implican disminuciones programadas significativas de las emisiones, cuyo efecto sobre las concentraciones de sulfatos en la atmósfera de Santiago, probablemente, podrán ser medidos antes que la capacidad de modelamiento disponible en el país haya mejorado lo suficiente como para estimarlo teóricamente.



## LA DIMENSIÓN CULTURAL DE LA POLÍTICA DE DESCONTAMINACIÓN

La amplia gama de planes que se desarrollan, muestra la variedad de actores involucrados en alcanzar logros significativos en el proceso de descontaminación de la Región Metropolitana.

Por un lado, están todas las entidades empresariales y sociales que van desde las industrias más grandes del país, hasta las simples familias que ejecutan acciones más domésticas, como calefaccionarse y transportarse.

Por otro, está la intervención pública diseminada en diversos organismos del Estado, muchos de los cuales nunca antes ejercieron responsabilidades en materias ambientales y donde falta a veces que la dimensión ambiental, entendida como un valor cultural, esté incorporada en sus funcionarios.

Pero más allá de toda esta realidad, a la base aparece un elemento fundamental para el éxito de cualquier plan de descontaminación: el compromiso individual por hacer su aporte a esta tarea de cada una de las personas involucradas.

Hoy se puede apreciar que la actitud de la población frente al medio ambiente es mucho más sensible que hace sólo algunos años y ello se puede apreciar sobretodo en la nueva generación. Lo importante es que esta nueva actitud implique también, en concreto, el cambio por hábitos más "amigos" de nuestro ambiente y sus recursos naturales.

Este nuevo escenario ha condicionado fuertemente el estilo de trabajo adoptado en el sector público vinculado a tareas de medio ambiente, tanto en la formación de grupos humanos al interior de los organismos del Estado, como en la búsqueda de éstos por mantener una estrecha comunicación con los organismos sociales donde se están formando los nuevos valores y actitudes ambientalistas.

## CONCLUSIONES

Desde el punto de vista del Estado, el problema de la contaminación atmosférica de Santiago ha dado lugar a cuatro tipos de acciones que reflejan las prioridades adoptadas.

En primer lugar, se ha pretendido asumir la crisis. Esto es, reconocer el problema frente al público, determinar sus reales dimensiones, adoptar acciones conducentes a su solución en el mediano y largo plazo, tomar medidas paliativas en las situaciones agudas de corto plazo.

En segundo lugar, se ha adoptado la política de atribuir la solución de los problemas a las entidades que lo causan: las distintas fuentes contaminantes que han sido identificadas a través de los inventarios de emisión. Esto pone al Estado en un rol donde la regulación es su mayor responsabilidad.

En tercer lugar, se ha emprendido un trabajo de largo aliento para adaptar el aparato estatal a este nuevo tipo de responsabilidades. La contaminación atmosférica de Santiago es uno de los muchos problemas ambientales graves que sufre el país y, circunstancialmente, es el primero en ser abordado en forma global. La tarea de formular y poner en marcha el plan de descontaminación, ha puesto de manifiesto carencias en las instituciones con alcance más amplio que este campo particular. Los ejemplos más notorios son los requerimientos de recursos humanos especializados, la necesidad de reforzar los organismos fiscalizadores, la insuficiencia de las actuales atribuciones del Estado para certificar y homologar productos, la deficiencia de los actuales sistemas para tarifar el uso de los bienes públicos, de los cuales la vialidad urbana es sólo un caso llamativo.

En cuarto lugar, el Estado ha empezado a responder por los problemas ambientales que él mismo causa o que es su responsabilidad directa prevenir. En esta categoría están las inversiones para abatir las emisiones de las fuentes estacionarias de propiedad pública, los planes de pavimentación y otras acciones en el campo de la infraestructura. Y en forma muy importante, la incorporación de la temática ambiental en la educación pública, reflejando la creciente importancia de estos temas en el ámbito cultural nacional.

En términos de las medidas específicas adoptadas para remediar el problema, el Plan Maestro incluye planes específicos para todas las fuentes conocidas de material particulado, así como para todos los tipos de contaminación de origen vehicular. Los vehículos juegan un rol protagónico en la contaminación atmosférica de Santiago, con algunas variantes que distinguen este caso de lo observado corrien-

temente en otros países: la importancia relativa de los vehículos diesel; la importancia relativa de los problemas asociados a la mantención de los vehículos; el rol de los vehículos como agente dispersante de polvo natural, activadores de una serie de fuentes pasivas, como las calles sin pavimentar o sedimentos arrastrados por las lluvias hasta las vías de circulación.

Los principales campos hacia los cuales se está expandiendo el plan, incluyen: los mecanismos, tanto activos como pasivos, que intervienen en las emisiones de polvo natural y, en términos exploratorios, la influencia del uso del fuego en las faenas agrícolas de la región circundante.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Plan Original

#### Programas Anuales sucesivos

- Programa de Descontaminación Ambiental del Área Metropolitana de Santiago, Abril de 1990. Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana.
- Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, Programa 1992.
- Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, Balance 1992 - Programa 1993, de Enero de 1993.

#### Decreto Supremo 4 del Ministerio de Salud.

Publicado en el diario oficial el 2 de Marzo de 1993 del Ministerio de Salud "Establece norma de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales"

#### Decreto Supremo 185 del Ministerio de Minería.

Publicado en el diario oficial el 16 de Enero de 1992 del Ministerio de Minería "Reglamenta funcionamiento de establecimientos emisores de anhídrido sulfuroso, material particulado y arsénico en todo el territorio de la República".

#### Decreto Supremo 211 (autos) del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones.

Publicado en el diario oficial el 11 de Diciembre de 1991 del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones "Normas sobre emisiones de vehículos motorizados livianos".





**CAPITULO 9**  
**INSTITUCIONALIDAD Y MARCO**  
**LEGAL VIGENTE**

*Ricardo Katz B.*

<i>Institucionalidad y marco legal vigente</i>	<i>263</i>
<i>Evolución histórica de la legislación ambiental en Chile</i>	<i>264</i>
<i>Estructura institucional vigente</i>	<i>273</i>
<i>Marco regulatorio, aspectos conceptuales y prácticos</i>	<i>277</i>
<i>Conclusiones. Marco teórico para el futuro</i>	<i>284</i>
<i>Referencias bibliográficas</i>	<i>286</i>



## INSTITUCIONALIDAD Y MARCO LEGAL VIGENTE

**E**ste capítulo ofrecerá una visión integral del camino recorrido por el Estado chileno en la implementación de políticas y acciones de control de la contaminación atmosférica. Tomando en consideración el alcance metropolitano (Santiago) de este trabajo, el desarrollo de este capítulo presentará un sesgo hacia los problemas específicos de la capital, por lo tanto las conclusiones no son necesariamente extrapolables al resto del país.

Para dar una visión integral, se describirá inicialmente la evolución que ha seguido la legislación ambiental en Chile, con énfasis en el aspecto de control de la contaminación atmosférica (a nivel emisiones y a nivel ambiental) y en el alcance metropolitano de la misma. Considerando el carácter indisoluble de la legislación (instancia normativa) con el aparato fiscalizador del Estado, se describirán además las distintas instituciones que han estado involucradas en el manejo del tema.

Por último, a través del análisis de los conceptos expresados en la legislación, se deducirá la política ambiental implícita que ha existido en el país para el control de la contaminación atmosférica. En este sentido, se debe recalcar que la regulación de la contaminación atmosférica se ha basado casi totalmente en el uso de las atribuciones administrativas de los Ministerios y Servicios, especialmente del Ministerio de Salud. Esta aclaración es de suma importancia si se considera que internacionalmente ha existido una tendencia a regular, a través de leyes, las políticas de control de la contaminación, dejando para el nivel reglamentario los aspectos relativos a la implementación directa de esas políticas. Esto no ha sido así en nuestro país, donde la instancia de definición de políticas, implementación de las mismas a través de reglamentos, y posterior control ha estado centrada en el poder ejecutivo.

A efectos de poner el tema en un contexto temporal relevante, es muy interesante comprender cómo ha evolucionado la percepción y preocupación de los

- **Ricardo Katz Bianchi**  
Ingeniero Civil, Universidad de Chile.  
M.Sc. Administración Ambiental,  
Universidad de Texas, USA.  
Estudios conducentes al Doctorado  
en Ingeniería Ambiental,  
Universidad de Texas, USA.  
Consultor, Director de Gestión  
Ambiental Consultores.  
Consultor Comisión Especial de  
Descontaminación de la Región  
Metropolitana (CEDRM), Banco  
Mundial y Banco Interamericano  
de Desarrollo (BID) en políticas  
de control de emisiones.  
Coordinador Comisión Medio Ambiente  
del Centro de Estudios Públicos (CEP).  
Profesor Departamento Ingeniería  
Industrial, Universidad de Chile.



especialistas, autoridades y población en general. Este análisis permitirá evitar los errores tanto nacionales como internacionales. Se presenta a continuación una breve síntesis del artículo escrito por Rafael Elizalde Mac-Clure en la revista Zig-Zag, en el número del 13 de mayo de 1960, titulado: "La amenaza del Brumo", que refleja claramente cómo, ya en esa fecha, se percibía el tema de la contaminación atmosférica de Santiago.

En él se señalaba: "Es la versión hispana del *smog*... es el precio que paga el hombre moderno por la industrialización. Y Santiago de Chile está más contaminado que Los Angeles de California". "La amenaza del *smog* está aún muy subestimada... Nuestro Servicio Nacional de Salud ha sido el precursor de un movimiento de saneamiento de la atmósfera local. Sin embargo, apenas cuenta con un puñado de técnicos y ayudantes que han estudiado nuestro problema. Carecen de aparatos de medición, de estaciones de muestreo y de toda clase de elementos técnicos y facilidades para llevar a efecto las indispensables investigaciones. El control del *brumo* significa la adopción de medidas que involucran grandes dispendios, tanto del sector público como privado, pero que ya va siendo tiempo de ponerlas en práctica".



## EVOLUCION HISTORICA DE LA LEGISLACION AMBIENTAL EN CHILE.

Esta revisión no pretende ser exhaustiva, sino recalcar los hitos más importantes en forma meramente cronológica.

Desde 1916 a la fecha, se han promulgado una serie de cuerpos legales, que directa o indirectamente, abordan el problema de la contaminación atmosférica en Chile. La ley 3.133 de 1916, "Neutralización de residuos provenientes de establecimientos industriales", dictada por el Ministerio de Obras Públicas, se refería tanto a la contaminación de cauces y ríos como a la del aire. En su artículo 2° señalaba expresamente: "La neutralización de los residuos, será necesaria en los establecimientos ubicados en las poblaciones o vecindades de ellas, siempre que dichos residuos contaminen el aire".

En 1961 se dicta el **Decreto 144 (02.05.61) del Ministerio de Salud**, el cual tuvo como objetivo regular las emisiones de contaminantes atmosféricos, tanto de fuentes fijas como móviles, en términos de la prohibición total de éstos, cuando causarían molestias y daños a la población. De esta manera, en su artículo 1°, establece que los gases, vapores, humos, polvo, emanaciones o contaminantes de cualquier naturaleza, producidos en cualquier establecimiento fabril o lugar de trabajo, deberán captarse o eliminarse en forma tal que no causen daños o molestias al vecindario. Por otra parte, en su artículo 8°, prohíbe la circulación de todo vehículo motorizado que

despida humo visible por su tubo de escape. Este decreto aún sigue vigente y ha sido utilizado como base legal para los dos decretos más modernos dictados en nuestro país, el 4 y el 185, sobre los cuales se presentan detalles más adelante.

Este decreto prohíbe, además, dentro del radio urbano de las ciudades, la incineración libre, sea en la vía pública o en los recintos privados, de hojas secas, basuras u otros desperdicios y contiene, asimismo, una serie de disposiciones tendientes a regular las emisiones provenientes de los equipos de combustión de los sistemas de calefacción, agua caliente e incineración de basuras de cualquier edificio.

Si bien fue inaplicable dado su carácter de "todo o nada", marcó un hito importante en la evolución de la legislación ambiental de control de la contaminación atmosférica, ya que creó la necesidad de fijar, entre otras cosas, normas de calidad de aire, métodos cuantitativos de análisis para los distintos contaminantes y normas de emisión de contaminantes atmosféricos. Lo que es más importante aún, le otorgó las atribuciones necesarias para tales efectos, al entonces Servicio Nacional de Salud.

En 1976, se da comienzo a la etapa de regulación mediante resoluciones exentas. Por la **Resolución 7077** del Ministerio de Salud, se prohibió la incineración de residuos sólidos en el área metropolitana de Santiago, ya sea como método de eliminación de residuos sólidos de origen industrial o doméstico.

Hasta esta Resolución, el control de la contaminación atmosférica se basaba en las prohibiciones de procesos o actividades, sin existir normas cuantitativas específicas, de emisión o de inmisión.

La segunda etapa en la evolución de la legislación atmosférica no se produce hasta 1978, en que se dictó la **Resolución 1.215 (22.06.78)** del Ministerio de Salud denominada "Normas Sanitarias Mínimas destinadas a prevenir y controlar la contaminación atmosférica". En ésta se establecen por primera vez los criterios de calidad del aire, es decir normas primarias de calidad del aire, recomendadas para proteger a la población de todo el país, tomando en consideración los contaminantes monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, oxidantes fotoquímicos, anhídrido sulfuroso y partículas totales en suspensión.

Otros aspectos importantes de esta Resolución fueron:

- se definen por primera vez términos tales como: contaminación atmosférica, contaminantes, fuente de contaminación atmosférica, norma de calidad del aire, norma de emisión, estudio de impacto ambiental y otros;
- se establecen los métodos oficiales de análisis (métodos de referencia) para los distintos contaminantes;
- se resumen y actualizan las disposiciones referidas a normas de emisión;
- se establecen normas sobre proyectos de control de emisiones provenientes de fuentes estacionarias.

En este período, el Ministerio de Salud dicta también las **Resoluciones 1.214, 137 y 970**, todas tendientes a controlar en forma cualitativa (humos visibles) y



cuantitativa (en porcentaje) las emisiones provenientes de vehículos motorizados. Es interesante destacar que en esa fecha, todos los aspectos relacionados con la contaminación atmosférica, independientemente de su origen, estaban radicados en el Ministerio de Salud Pública, por lo tanto, existía una primacía del efecto (emisión/contaminación) sobre la actividad sectorial que lo causaba.

En el mismo período y, también por el Ministerio de Salud, es dictada la **Resolución 611**, tendiente a controlar las emisiones provenientes de procesos industriales de la Región Metropolitana. En esta Resolución se establecen las normas de emisión para humos de las fuentes estacionarias de combustión, prohibiéndose la emisión de éstos, con densidad colorimétrica superior al padrón N° 2 de la Escala Ringelman (salvo para un período único de 15 minutos al día para la operación de calentamiento del equipo y por un período de 3 minutos, consecutivos o no, en el lapso de una hora), y la norma de emisión para partículas, la cual se fija en  $112 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  de aire como máximo.

Por primera vez, para el caso de las emisiones de fuentes fijas, se define un límite cuantitativo específico que conduce a la necesidad de medir en forma cuantitativa y estandarizada. Se comienza a usar **espontáneamente** la metodología EPA, de monitoreo en chimeneas, ya que el método específico no se reguló oficialmente hasta mucho tiempo después.

El **Decreto Ley 3.260** de 1980, del Ministerio del Interior, estableció el régimen de gobierno y administración de la Región Metropolitana, quedando en el Intendente Regional la facultad de coordinar las acciones tendientes a la preservación del medio ambiente en la región y supervisar el cumplimiento de las medidas acordadas. Aparece otro hito en cuanto a la institucionalidad ambiental; se genera una atribución específica para las autoridades de la Región Metropolitana, considerando que es en ella donde existen una serie de problemas localizados.

En 1982, se crea el **Servicio de Salud del Ambiente de la Región Metropolitana**, como un servicio público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio para la ejecución de las acciones necesarias para la protección de la población de los riesgos producidos por el medio ambiente. Esta acción, es coherente con el hito anteriormente señalado, ya que es sólo en la Región Metropolitana donde se concentran todos los Departamentos del ambiente en un sólo Servicio, que se transforma en el único Servicio del Ambiente a nivel nacional.

Un nuevo hito en el control de las emisiones atmosféricas se produce en 1983, con el traspaso de las atribuciones del Ministerio de Salud al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, para el control de emisiones de fuentes móviles. En virtud de este traspaso el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones dicta el **Decreto 279 (15.07.83)**, mediante el cual se aprueba el Reglamento para el control de la emisión de contaminantes de vehículos motorizados de combustión interna.

En este Decreto se fijan las concentraciones máximas permisibles de monóxido de carbono emitidas por el tubo de escape de vehículos bencineros, de humo visible

tanto para vehículos bencineros como diesel, además del índice de ennegrecimiento (Bosch) para éstos últimos, mediante el cual se establece una relación entre el índice de ennegrecimiento del filtro y la potencia del motor.

El Decreto 279 derogó la Resoluciones 1.214, 970 y 137 anteriormente mencionadas.

A pesar de existir todas las disposiciones anteriormente citadas para el control de las emisiones de contaminantes atmosféricos, prácticamente éstas no se aplicaron, debido a la poca fiscalización existente, a la presión ejercida por los distintos sectores involucrados y, en general, porque faltaban aún los estudios complementarios tendientes, por una parte, a identificar los contaminantes específicos, que permitieran la elaboración de medidas de control acotadas, así como las modificaciones pertinentes de la legislación, y por la otra, actualizar y optimizar el catastro de fuentes emisoras de manera de posibilitar una acción efectiva en el caso de que los niveles de contaminación superaran los límites aceptables.

Hasta 1987, existía en Santiago sólo una red manual de monitoreo de contaminantes atmosféricos. Esta red comenzó a operar en el año 1967, con estaciones de la OPS (Organización Panamericana de la Salud), que medían Índice de Ennegrecimiento y Acidez. Posteriormente, en 1976, las mediciones se hicieron en forma más sistemática, implementándose el Sistema Metropolitano de Vigilancia de Calidad del Aire, consistente en diecisiete estaciones de monitoreo manuales ubicadas en distintos puntos del área metropolitana. Con esta red se medían los contaminantes: PTS,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  y HC. No existía, sin embargo, simultaneidad en las mediciones, ya que no todas las estaciones medían los mismos contaminantes. De hecho, el monóxido de carbono y los hidrocarburos sólo se medían en una estación.

En 1985, comienza una nueva etapa, con el proyecto de "Estudios de la contaminación atmosférica, hídrica, suelos y ruido en la Región Metropolitana", financiado mediante un crédito otorgado por el Banco Interamericano de Desarrollo y con aportes de las municipalidades de la Región. A través de este proyecto se instala en Santiago la Red Monitora Automática de Contaminantes Atmosféricos, denominada red MACAM, que consta de cuatro estaciones fijas más una móvil. Las cuatro primeras conectadas en línea a una central de procesamiento de datos. La red MACAM mide:  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$ , HCT (salvo en la estación móvil, que además mide  $\text{CH}_4$ ) y  $\text{NO}_x$ , además de variables meteorológicas de alcance local. Cabe señalar que la antigua red de vigilancia de calidad del aire sigue operando en la actualidad, con siete estaciones semiautomáticas.

Utilizando la información generada, el Ministerio de Salud, en 1988, dicta la **Resolución Exenta 369 (12.04.88)**, en la cual se establece un Índice de Calidad del Aire referido a gases (ICA) y un Índice de Calidad del Aire referido a partículas (ICAP), ambos para ser utilizados en la ciudad de Santiago. La Resolución establece cuatro zonas circundantes a las estaciones de monitoreo y, para cada una de estas zonas, se calculan cuatro subíndices de calidad considerando los contaminantes:



monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y oxidantes fotoquímicos, en el caso de los gases. En el caso del ICAP, se utiliza la concentración de material particulado de tamaño menor a  $10 \mu\text{m}$  (PM10).

Esta situación marca la primera vez que se consagra oficialmente el uso de PM10 como indicador de calidad del aire (siguiendo con las directrices normalmente utilizadas en nuestro país, se copiaron los valores correspondientes a las normas primarias de calidad ambiental de la EPA). Cabe recalcar que, hasta finales de 1991, esta situación no fue recogida por el Ministerio de Salud. Sólo el Decreto 185 de enero de 1992, oficializa el uso de la norma diaria de PM10, no ocurriendo lo mismo para el caso de la norma anual. La razón de no adoptar la norma anual corresponde a un criterio político, considerando que en ese caso se deberían haber declarado como saturadas muchas áreas del país.

Mediante Resoluciones anuales, el Ministerio de Salud permite que la autoridad sanitaria ordene la paralización por periodos de 24 horas, renovables, de aquellas actividades (fuentes fijas), ordenadas de mayor a menor, responsables del 20% (pre-emergencia) o 50% (emergencia), de las emisiones de partículas, cuando el ICAP supera los valores de los estimadores determinados para cada estación de monitoreo. Se habla de estimadores dado que la medición de material particulado tiene un desfase de 24 horas, producto de la necesaria ambientación del filtro. En cambio, las medidas de emergencia deben ser implementadas lo antes posible. Para estos efectos, inicialmente, se utilizaron estimadores basados en monitoreos de absorción de radiación Beta, para pasar luego a estimadores que utilizan filtros de material particulado sin ambientar. En la actualidad, el índice es calculado a través de mediciones en tiempo real con un TEOMS (equipo que usa un método de medición equivalente al método gravimétrico). Paralelamente, se están validando mediciones de un monitor Beta horario, aceptado como método equivalente por la EPA.

El 18 de abril de 1990, mediante el Decreto 349 del Ministerio del Interior, se crea la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, cuyo objetivo será el de formular los planes de descontaminación para la Región. Esta Comisión reemplazó en todas sus funciones a la Comisión de Ecología de la Región Metropolitana, creada en 1984. La Comisión asumió las labores de coordinación y dirección de los planes de descontaminación con gran ímpetu. Tanto así, que en la actualidad su liderazgo no es discutido por ninguna de las instituciones involucradas en el tema.

El Decreto 32 del Ministerio de Salud (19.02.90), reglamentó el funcionamiento de las fuentes fijas emisoras de partículas en situaciones de preemergencia o emergencia de contaminación atmosférica. En el caso de preemergencia, se detienen aquellas industrias con la mayor concentración de emisiones responsables del 20% de la emisión industrial; en el caso de emergencia, esta cifra se amplía al 50%. Este Decreto es modificado y complementado por el Decreto 322 (07.05.91). En la misma fecha, se dicta el Decreto 321, el que ratifica la Resolución 611, sobre la cual existía discusión en cuanto a su derogación implícita, formalizando por tanto la

norma de emisión para partículas en  $112 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$  para las fuentes fijas. Complementariamente, estos Decretos especifican los métodos de muestreo válidos en chimenea y los porcentajes de exceso de aire bajo los cuales deben ser corregidos los valores de emisión medidos.

Adicionalmente, se han dictado una serie de disposiciones temporales destinadas a prevenir el aumento de los niveles de contaminación en la Región Metropolitana, en días o periodos críticos, tales como:

- prohibición del funcionamiento de chimeneas para calefacción en algunas comunas de la Región Metropolitana, que no estén provistas de sistemas de doble cámara o mecanismos de captación de partículas. Normalmente esta limitación es válida hasta el 31 de agosto de cada año.
- prohibición del uso del fuego para la quema de rastrojos, ramas y otros, desde el 1° de mayo al 31 de agosto de cada año, en los terrenos agrícolas, ganaderos o de aptitud preferentemente forestal, en las provincias Cordillera, Maipo, Talagante, Santiago y Cachapoal. La quema de neumáticos u otros elementos contaminantes para la agricultura, como práctica para prevenir o evitar las heladas, queda prohibida en todo el territorio nacional.

El último hito de importancia, comenzó a desarrollarse durante 1991, año en el que se discutieron dos iniciativas de gran trascendencia para la regulación y control de la contaminación atmosférica en Chile, el Decreto Supremo 185 y el Decreto Supremo 4.

El Decreto Supremo 185 del Ministerio de Minería, establece normas primarias y secundarias de calidad ambiental de alcance nacional. El ámbito de aplicación general de este decreto son las fuentes que emiten más de 1 ton/día de material particulado o más de 3 ton/día de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), por chimenea, y autoriza además la fijación de estándares para otros contaminantes como el arsénico. Complementariamente divide al país en dos grandes zonas, en función de la actividad productiva principal existente en cada una, y establece procedimientos para la disminución de emisiones y para el ingreso de nuevas fuentes.

Estos mecanismos tienen la peculiaridad de que, por primera vez en el país, se comienzan a utilizar instrumentos de mercado en vez de regulaciones directas por parte del Estado.

El Decreto Supremo 4 del Ministerio de Salud, tiene por objetivo el establecimiento de normas de emisión de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. Es posiblemente la pieza de legislación de mayor relevancia conceptual, para el control de la contaminación atmosférica en áreas urbanas, que haya sido dictada últimamente. Es necesario dejar constancia que, tanto la génesis conceptual como el desarrollo directo de este Decreto, estuvieron a cargo de profesionales de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM). Dado que esta última no tiene atribuciones normativas, el dictado del Decreto lo efectuó el Ministerio de Salud.



Las características más relevantes del D.S.4, de aplicación en la Región Metropolitana y que regula las emisiones de material particulado de las fuentes con un caudal mayor a 1.000 m<sup>3</sup>/hr, por chimenea, son:

- Prohibición del aumento (congelamiento) a la fecha de publicación del D.S.4, de las emisiones totales de las fuentes puntuales existentes en la Región Metropolitana.
- Establecimiento de una norma de emisión expresada como concentración, que dice: "las fuentes estacionarias puntuales no podrán emitir material particulado en concentraciones superiores a 112 mg/m<sup>3</sup>N", y "se otorga a las fuentes estacionarias puntuales plazo hasta el 31 de diciembre de 1992 para alcanzar" el nivel anteriormente establecido.
- Reducción global de las emisiones máxicas por unidad de tiempo de todas las fuentes estacionarias puntuales de la Región Metropolitana.

La restricción vehicular ha sido la herramienta más usada en el control de las emisiones de las fuentes móviles. Se comenzó a aplicar en 1986, en forma esporádica, sólo en los días en que el Servicio de Salud del Ambiente establecía que había emergencia por contaminación atmosférica. Dependiendo de los niveles, se aplicaba al 20% del parque vehicular en toda el área metropolitana, sumándose un 20% adicional a un área céntrica predeterminada por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, cuando los niveles eran críticos. En situaciones de niveles denominados peligrosos, el 40% de restricción se hacía extensivo a toda el área metropolitana. Este sistema fue evolucionando y, en la actualidad, se aplica en forma permanente durante 8 meses al año (de abril a noviembre), estando restringidos de circular un 20% de los vehículos diariamente, de lunes a viernes. Los fines de semana se mantiene la restricción para un 50% de la locomoción colectiva. De acuerdo a los niveles de contaminación del aire, se aumenta al 40% los vehículos restringidos en el área céntrica o a toda el área metropolitana.

Entre los años 1989 y 1991, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones dictó una serie de Decretos, todos con el objeto de controlar las emisiones de las fuentes móviles. Estos son:

- El **Decreto Supremo 24** (01.02.89), establece la Revisión Técnica y Verificación de Emisión de Contaminación de Buses y Taxibuses, que presten servicios en el territorio de la Provincia de Santiago y las comunas de Puente Alto y San Bernardo, las que deberán efectuar revisión trimestral.
- El **Decreto Supremo 69** (29.03.89), estableció los niveles máxicos de emisión de contaminantes evacuados por el tubo de escape de los vehículos motorizados dotados de motor de combustión interna, que operen según el ciclo diesel o el ciclo otto de dos o cuatro tiempos, y los aspectos normativos y técnicos para su control. Este Decreto ha sido modificado en sus aspectos normativos y técnicos por los Decretos 134, 11, 57, 37 y 149.

- El **Decreto 211** (16/10/91), que estableció normas de emisión para los vehículos livianos, y fue modificado por el D.S 39 (20.02.92). Con este Decreto, por primera vez se establecen normas para la certificación de emisiones de vehículos nuevos.

En una primera etapa, el ámbito de aplicación del Decreto 211 se extiende a las regiones Metropolitana, Quinta y Sexta, comenzando a regir el 1° de septiembre de 1992. De acuerdo a lo establecido en el Decreto, sólo podrán circular en las citadas regiones, los vehículos motorizados livianos que sean mecánicamente aptos para cumplir los niveles máxicos de emisión señalados en el artículo 4° del Decreto y, siempre que, con oportunidad de sus revisiones técnicas, se acredite que están en condiciones adecuadas de circular. A estos vehículos se les entregará un autoadhesivo verde. Los vehículos motorizados livianos inscritos o en trámite de inscripción entre el 1° de enero de 1988 y el 1° de septiembre de 1992, que cumplan con las normas de emisión del artículo 4°, recibirán también un autoadhesivo verde.

Aquellos vehículos motorizados livianos cuya inscripción en el Registro de Vehículos Motorizados se solicite a contar del 1° de septiembre de 1992 y que no cumplan con las normas de emisión del artículo 4°, recibirán un autoadhesivo de color rojo y no podrán circular en las regiones antes mencionadas, salvo los días feriados y en aquellas vías de paso que determine el Ministerio de Transportes. Tampoco regirá en las regiones Quinta y Sexta durante los meses de enero y febrero.

Este Decreto tiene aplicación nacional, a contar del 1° de septiembre de 1994, fecha en que todos los vehículos motorizados livianos nuevos sólo podrán circular en el territorio nacional si cumplen con las normas de emisión del artículo 4 del D.S. 211.

En este Decreto también se establece la forma en que se realizarán las revisiones técnicas.

Durante el año 1992, se aprobó mediante Ley, la facultad del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de licitar vías para recorridos de locomoción colectiva. De acuerdo a lo establecido por el Ministerio, la licitación se otorga por un plazo de 18 meses, y los vehículos que se la adjudican tienen como exigencia, entre otras, que el sistema de bomba inyectora debe ser mantenido en talleres que el Ministerio señale. Asimismo se les da la posibilidad de prolongar el plazo de la licitación por un período de 18 meses, a aquellas líneas en que al menos el 50% de la flota disponga de tecnología anticontaminante. Se definió como tecnología no contaminante aquella que permita cumplir con las normas de emisión EPA 91, para motores pesados. En el caso chileno, el parque utiliza motores diesel, por lo tanto, tendrían una norma de 0,25 grs/bHP-hora, para partículas y las correspondientes para gases.

Con fecha 16 de octubre de 1992, comenzó a operar por primera vez la licitación de recorridos de la locomoción colectiva, en la que se encuentran participando unos 6.000 vehículos entre buses y taxibuses.

En la Figura N° 9.1, se resume lo que ha sido la evolución de la legislación referida a la contaminación atmosférica, así como la gestión pública en el tratamiento de la materia.



**PRIMER PERIODO 1916 - 1961**

- Legislación cualitativa y discreta (todo o nada).
- Atribuciones centradas en Ministerio de Salud.
- Objetivos de salud pública.
- Regulación por decretos y sólo para fuentes fijas.

**SEGUNDO PERIODO 1961 - 1978**

- Aparece regulación específica con objetivo de controlar la C. Atmosférica.
- Regulación por decretos.
- Regulación de fuentes fijas y móviles. Las fijas son las más controladas.
- Atribuciones centradas en Ministerio de Salud.
- Primeras mediciones ambientales.

**TERCER PERIODO 1978 - 1990**

- Comienza la regulación por resoluciones.
- Se dictan las normas primarias de calidad ambiental.
- La contaminación atmosférica se populariza.
- Se instalan monitores ambientales.
- Se realizan inventarios de emisión.
- Se dictan normas de emisión para fuentes fijas y móviles.
- Los sectores, distintos a Salud, asumen atribuciones normativas y de control (Transporte).
- Aparecen las instancias de coordinación.

**CUARTO PERIODO 1990**

- Las instancias de coordinación asumen el rol de dictado de políticas y presencia pública.
- Los sectores se transforman en normativos y contralores.
- El Ministerio de Salud pierde importancia en el tema.
- Las fuentes móviles se transforman en el centro del control.
- Se preparan leyes marco que orientan la acción del ejecutivo.
- Se comienzan a utilizar instrumentos de mercado para la regulación de la C. Atmosférica.
- Las normas de emisión e inmisión y procedimientos de medición relacionados adquieren una alta sofisticación.

Llegados a este punto, cabe señalar que el cuarto período termina el año 1992. El quinto período estará caracterizado por la vigencia de la ley de bases del medio ambiente y los reglamentos y leyes sectoriales que se generen a partir de ella.

La ley de bases contiene los lineamientos relevantes para el control de la contaminación atmosférica. Está en discusión en el Congreso. Varios puntos de los mencionados están siendo sujetos a indicaciones tendientes a su modificación. Pueden existir alteraciones sustanciales al actual significado de la ley. De hecho, esto ya sucedió entre el mensaje del Ejecutivo (septiembre de 1992) y la versión actual discutida en el Congreso. Los lineamientos más relevantes de esta ley, son:

- Definiciones de contaminación, normas de calidad ambiental y zonas latentes y saturadas.
- Procedimientos de dictado de normas de calidad ambiental, incluyendo criterios de emergencia.
- Definición de normas de emisión y lineamientos para su aplicación.
- Procedimientos para el control de la calidad ambiental a través de los planes de prevención, descontaminación y regulaciones especiales de emergencia.
- Establecimiento de los instrumentos de gestión ambiental, tales como normas de emisión, licencias de emisión transables e impuestos.
- Definición de responsabilidades, daño ambiental y sanciones.

**ESTRUCTURA INSTITUCIONAL VIGENTE****DESCRIPCION DEL MARCO CONCEPTUAL**

De acuerdo a lo señalado anteriormente, la política de control de la contaminación atmosférica ha ido evolucionando a través del tiempo, generándose, formal e informalmente en la Región Metropolitana, los mecanismos de gestión pública actuales.

En 1990, se crea la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana (CEDRM), única región en el país que cuenta con una instancia de este tipo, encargada de formular y coordinar los planes de descontaminación, los cuales son propuestos al Presidente de la República para ser aplicados a través del Ministerio que corresponda o para que patrocine las iniciativas de Ley que sean procedentes de acuerdo con el artículo 19 N° 8 de la Constitución Política de la República.

Esta Comisión no tiene atribuciones normativas ni contraloras, quedando éstas en los Ministerios y Secretarías Ministeriales respectivamente. Está constituida por una Secretaría Técnica y Administrativa, un Comité de Ministros y un Comité Operativo.

Figura N° 9.1: Evolución de la gestión pública de la contaminación atmosférica

Conceptualmente, en lo referente a la Comisión, cabe destacar que:

- se ha optado por un mecanismo de coordinación, en vez de gestión directa;
- se trata integralmente el tema de la contaminación, en vez de separarlo en aire, agua, suelo y otros tipos de contaminación;
- las atribuciones normativas residen en los Ministerios y las fiscalizadoras en las Secretarías Ministeriales correspondientes.

Este mecanismo de gestión pública tiene el inconveniente, y de hecho se presenta, que la aplicación de los planes propuestos por la Comisión queda sujeta a la voluntad de los Ministerios, lo que en la práctica ha producido conflicto de intereses entre la Comisión y el Ministerio correspondiente.

Por otra parte, al asumir la Comisión el liderazgo en la materia, aparece ante la opinión pública como la única responsable de todos los problemas, desligando a las demás instituciones.

En la Figura 9.2, se presenta la interpretación del marco conceptual inferido de los mecanismos de gestión anteriormente descritos. En los recuadros aparecen las instituciones, y en negrilla las funciones. Se presentan subrayados los cambios que pueden ocurrir cuando la CEDRM se transforme en Comisión Regional del Medio Ambiente (COREMA).

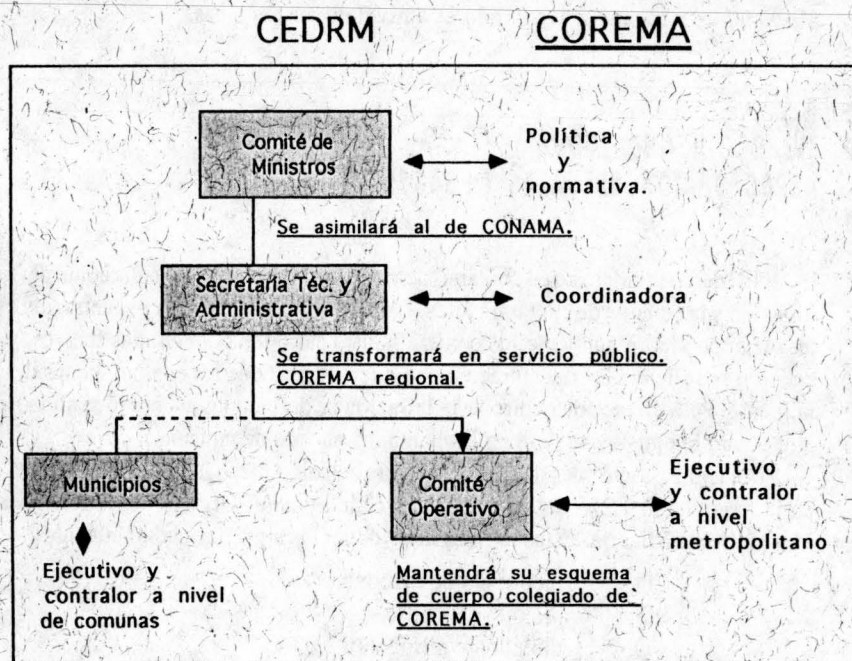


Figura N° 9.2: Esquema de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana y, posteriormente, de la Comisión Regional del Medio Ambiente

Una vez que la ley de bases sea promulgada, la CEDRM se convertirá en la Comisión Regional del Medio Ambiente, aunque no se prevé un cambio sustancial en las relaciones funcionales y operativas.

En este sentido, sus funciones y atribuciones se verán aumentadas ya que, complementariamente a su labor de gestión de contaminación (atmosférica, hídrica y de residuos sólidos), deberá actuar como ventanilla única en el sistema de evaluación de impacto ambiental, lo que redundará en un aumento de tareas y probablemente en una disminución relativa de la dedicación a los aspectos de gestión de contaminación.

### INSTITUCIONES INVOLUCRADAS Y SUS FUNCIONES PRINCIPALES

La Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, es la instancia que ha liderado, desde su creación en 1990, los planes de descontaminación ambiental de la Región.

El Comité de Ministros es la instancia máxima de la Comisión en materia de aprobación de los planes. Está presidido por el Ministro del Interior y formado además por los Ministros de Hacienda, de Economía, Fomento y Reconstrucción, de Obras Públicas, de Vivienda y Urbanismo, de Transportes y Telecomunicaciones, de Salud, de Bienes Nacionales, el Secretario General de la Presidencia y el Presidente de la Comisión Nacional de Energía.

El Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), que será el que reemplace al de la CEDRM, estaría constituido por los ministros de la Secretaría General de la Presidencia (quien lo presidirá), Economía, Fomento y Reconstrucción, Obras Públicas, Agricultura, Salud, Minería, Vivienda y Urbanismo, Transportes y Telecomunicaciones y Planificación y Cooperación.

El Comité Operativo de la CEDRM está formado por el Intendente de la Región Metropolitana, el Alcalde de Santiago, los Secretarios Regionales Ministeriales de la Región Metropolitana pertenecientes a Transportes, Vivienda y Obras Públicas, el Director del Servicio Metropolitano de Salud del Ambiente, el Gerente General de la Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias, el Secretario Ejecutivo de la Comisión Nacional de Energía, el Secretario Ejecutivo de la Comisión Nacional de Medio Ambiente, un representante del Secretario General de Gobierno y uno de la Jefatura Metropolitana de Carabineros de Chile.

La Secretaría Técnica y Administrativa es el organismo que asesora técnicamente a la Comisión, siendo además el responsable de proponer la formulación de los planes y programas y de supervisar su puesta en marcha. Esta Secretaría depende de la Secretaría General de la Presidencia.



Las funciones de los Comités y de la Secretaría se muestran a continuación:

**Tabla N° 9.1:** Funciones de los Comités y de la Secretaría Ejecutiva de la Comisión Especial de Descontaminación de la Región Metropolitana.

CEDRM		
COMITE	COMITE OPERATIVO	SECRETARIA TECNICA Y ADMINISTRATIVA
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proponer el Plan de Descontaminación de la R.M.; tomar conocimiento de los programas de acción que determine el Pdt. de la República al respecto, proponer medidas para su adecuada implementación y asesorar al Poder Ejecutivo en la fiscalización de la ejecución de los mismos.</li> <li>• Aprobar el programa anual de estudios que proponga la Sec. T. y A. para la formulación e implementación del Plan.</li> <li>• Difundir a través de las respectivas Secretarías de Estado los planes y programas a implementarse.</li> <li>• Recomendar al Pdt. de la República la utilización de créditos externos para estudios o inversiones relacionados con la implementación del Plan.</li> <li>• Proponer al Pdt. de la República las modificaciones de orden legal, que importen restricciones de los derechos y libertades, indispensables para proteger el medio ambiente.</li> <li>• Aprobar el programa anual de trabajo de la Comisión.</li> <li>• Requerir por orden del Pdt. de la República, a través de la Secretaría Técnica y Administrativa, a los Ministerios, Servicios Públicos, Múncip. y entidades en que el estado tenga aportes de capital, participación o representación mayoritarios, los antecedentes y la información necesarios para el cumplimiento de sus funciones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Participar en las proposiciones de diseño e implementación de políticas sectoriales y transectoriales en lo que digan relación con las actividades contenidas en el Plan.</li> <li>• Participar en la formulación, que debe hacer la Secretaría Técnica y Administrativa, de las actividades del Plan y de los programas correspondientes.</li> <li>• Asesorar en la adecuada coordinación y controlar las actividades de cada servicio o Institución participante y las políticas, planes y programas definidos intersectorialmente por el Comité de Ministros, en lo que diga relación con los contenidos del Plan y sus programas.</li> <li>• Solicitar a los Ministerios y Servicios que tengan representantes en los Comités de la Comisión que autoricen al personal de sus dependencias para que trabajen en comisión de servicio en la Sec. Téc. y Adm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asesorar al Comité operativo en las materias a que éste le conciernen y velar por el cumplimiento de sus acuerdos.</li> <li>• Elaborar planes, estudios metodológicos y procedimientos a fin de ser propuestos al Comité de Ministros y al Comité operativo.</li> <li>• Asesorar en las tareas de coordinación de actividades y funciones técnicas entre los distintos organismos representados por el Comité.</li> <li>• Proponer mecanismos dotados de la suficiente capacidad técnica para la supervisión de las fuentes contaminantes, como asimismo su ubicación institucional, velando por su adecuado funcionamiento.</li> <li>• Realizar las acciones necesarias, dentro del ámbito de su competencia, para facilitar el cumplimiento del Programa de trabajo que apruebe la Comisión.</li> <li>• Asesorar técnicamente en los programas de inversión en descontaminación financiados con fondos locales o de cooperación internacional.</li> </ul>

Las atribuciones normativas y fiscalizadoras residen en distintas instituciones según su competencia. A continuación se presentan aquellas de mayor relevancia.

**Ministerio de Salud:** encargado de la normativa para el control de las fuentes fijas puntuales y grupales, y de la calidad del aire.

**Secretaría Regional Ministerial de Salud:** contralora de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud.

**Servicio de Salud del Ambiente:** función contralora para el cumplimiento de la normativa fuentes fijas y vigilancia de la calidad del aire.

**Ministerio de Transportes:** encargado de la normativa para el control de las fuentes móviles.

**Secretaría Regional Ministerial de Transportes:** función contralora para el cumplimiento de la normativa fuentes móviles.

**Carabineros y Municipalidades:** apoyo en la función fiscalizadora para el cumplimiento de la normativa de fuentes fijas y móviles.

**Ministerio de Agricultura:** encargado de la proposición de normas ambientales secundarias en áreas agrícolas.

**Ministerio de Minería:** encargado de la proposición de normas ambientales primarias en áreas agrícolas.

**Municipios:** normativos y contralores a nivel de sus comunas.



## MARCO REGULATORIO, ASPECTOS CONCEPTUALES Y PRACTICOS

[El marco regulatorio en contaminación atmosférica involucra dos conceptos: inmisión y la emisión de contaminantes. La inmisión se refiere a la concentración que alcanzan en el aire ambiente los contaminantes emitidos por distintas fuentes, y emisión se refiere a la concentración con que son emitidos los contaminantes desde la fuente. Para efectos de controlar la inmisión se definen las normas de calidad de aire y para la emisión se definen las llamadas normas de emisión.]

En Chile, las normas de calidad del aire actualmente vigentes, están contenidas en la Resolución 1.215 del Ministerio de Salud y en el Decreto Supremo 185 del Ministerio de Minería. Estas normas consideran los siguientes contaminantes:

CO	monóxido de carbono
SO <sub>2</sub>	dióxido de azufre
NO <sub>2</sub>	dióxido de nitrógeno
O <sub>3</sub>	ozono
PTS	material particulado total
PM10	material particulado respirable (de tamaño < a 10 µm.)

En el caso de las normas de emisión, se deben diferenciar aquellas referidas a las fuentes móviles, de las fuentes fijas. Las primeras están contenidas en el Decreto Supremo 69 y en el Decreto Supremo 211, ambos del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Estas normas se dividen en aquellas que regulan la autorización de circulación de vehículos nuevos y las que regulan la revisión técnica. Si bien ambos Decretos han sido modificados, se consideran básicos, ya que los cambios introducidos no afectan la esencia de los mismos.

Para las fuentes fijas, los dos Decretos más importantes, en relación a las normas de emisión son, el D.S. 4 del Ministerio de Salud (específico para la Región Metropolitana), y el D.S. 185 del Ministerio de Minería.

Cabe destacar que, en el caso de las fuentes fijas en la Región Metropolitana, se ha optado por concentrar los esfuerzos en regular las emisiones de material particulado, dado que es el contaminante más importante desde el punto de vista de los niveles que alcanza y por sus efectos sobre la salud de las personas. Por esta razón, es el único contaminante que tiene norma de emisión.

### PROCEDIMIENTO DE DICTADO DE NORMAS

Este es un tema sobre el cual se ha discutido mucho en nuestro país. Para efectos de este capítulo, lo importante de destacar es que las atribuciones normativas, tanto de emisión como de calidad ambiental, están localizadas en el poder ejecutivo, el que cuenta con absoluta discrecionalidad para estos efectos, pudiendo incluso utilizar resoluciones exentas.

Dentro del poder ejecutivo, las atribuciones normativas están localizadas en los ministerios. Esta situación implica que la normativa generada tiende a ser de alcance nacional, en desmedro de las situaciones, realidades e intereses regionales.

Ultimamente, la normativa generada por instituciones distintas al Ministerio de Salud, han considerado las peculiaridades regionales. Complementariamente, el proceso de generación de las normas ha tendido a ser más participativo, convocando a los distintos agentes involucrados. Esto significa que las normas generadas tienen mayores posibilidades de ser efectivas (ya que reúnen la aceptación de los sectores) y de ser estables en el tiempo.

### NORMAS DE CALIDAD DEL AIRE

Las normas de calidad del aire actualmente vigentes en el país, se resumen en la Tabla N° 9.2, que se presenta a continuación:

Tabla N° 9.2: Normas primarias y secundarias de calidad del aire vigentes en la Región Metropolitana.

Contaminante	1 h	8 hs.	24 hs.	1 año
<b>Normas Primarias</b>				
CO	35 ppm(1)	9 ppm(1) 40 ppm 50 ppm	-	-
SO <sub>2</sub>			365 µg/m <sup>3</sup> (1)	80 µg/m <sup>3</sup> 2.056 µg/m <sup>3</sup> 2.620 µg/m <sup>3</sup>
O <sub>3</sub>	160 µg/m <sup>3</sup> (1)	1.090 µg/m <sup>3</sup> 1.400 µg/m <sup>3</sup>		
NO <sub>2</sub>			100 µg/m <sup>3</sup>	2.930 µg/m <sup>3</sup> 3.750 µg/m <sup>3</sup>
PTS			260 µg/m <sup>3</sup> (1)	75 µg/m <sup>3</sup> (2)
PM10			150 µg/m <sup>3</sup> (3)	285 µg/m <sup>3</sup> 330 µg/m <sup>3</sup> (5)
<b>Normas secundarias</b>				
SO <sub>2</sub>	700 µg/m <sup>3</sup> (4)			

Nota: Los valores en negrilla corresponden a los puntos de quiebre del Índice de Calidad de Aire, de las categorías: crítico y peligroso, respectivamente. Si bien no corresponden a normas de calidad ambiental, se han incorporado a la tabla por ser "normas de hecho" ya que se usan para la toma de decisiones relativas para la aplicación de planes de emergencia.

- (1) Concentración media aritmética de 1, 8, 24 hs. o anual, no debe sobrepasarse este valor más de una vez al año.
- (2) Concentración media geométrica anual.
- (3) Concentración media aritmética diaria.
- (4) Para fijar esta norma secundaria, el Decreto 185 dividió el territorio nacional en dos áreas. Este valor corresponde a la norma correspondiente a la región metropolitana. Dado que es una norma secundaria, quedan excluidas las áreas urbanas e industriales calificadas como tales.
- (5) La EPA sitúa el punto de quiebre para la categoría peligroso en 660 µg/m<sup>3</sup>.



### Métodos de medición

Los métodos y frecuencias de medición para los distintos contaminantes se encuentran establecidos en el Decreto 185 y en la Resolución 1.215.

### Recursos disponibles

El monitoreo de la calidad del aire en la Región Metropolitana, se inició en forma sistemática y regular en 1977. En ese año se implementó el Sistema Metropolitano de Vigilancia de Calidad del Aire, que consistía en diecisiete estaciones de monitoreo manuales ubicadas en distintos puntos del área metropolitana. Posteriormente, en 1987, comenzó la implementación de la Red MACAM. Esta red está constituida por cuatro estaciones fijas y una móvil, denominadas: EMA, EMB, EMC, EMD y EMM respectivamente, además de una estación meteorológica denominada EM. La ubicación de estas estaciones es:

EMA	Plaza Almirante Lorenzo Gotuzzo.
EMB	Parque Gran Bretaña, Providencia 200.
EMC	Clínica Psiquiátrica, Universidad de Chile, Av. La Paz 1003.
EMD	Parque O'Higgins, Tupper frente a Plaza Ercilla.
EMM	Estadio Las Condes, Av. Las Condes 11755.
EM	Escuela Técnica de Aeronáutica, Quinta Normal.

### NORMAS DE EMISION PARA FUENTES FIJAS

Las normas de emisión para fuentes fijas están contenidas en el D.S. 4 del Ministerio de Salud y el D.S. 185 del Ministerio de Minería.

El D.S. 4, se aplica a las fuentes estacionarias puntuales y grupales que se encuentren ubicadas en la Región Metropolitana, definiéndose estas fuentes como:

- **Fuente estacionaria puntual:** es toda fuente estacionaria cuyo caudal o flujo volumétrico de emisión es superior o igual a 1.000 m<sup>3</sup>/hr, bajo condiciones estándar, medido a plena carga. Las fuentes estacionarias son aquellas diseñadas para operar en un lugar fijo, cuyas emisiones se descargan a través de ductos o chimeneas. Se exceptúan las fuentes estacionarias puntuales que emitan más de 1 tonelada diaria de material particulado, en las condiciones especificadas en el artículo 4° del D.S. 4, las que se regirán por el D.S. 185 del Ministerio de Minería. También se exceptúan las fuentes estacionarias grupales destinadas a la calefacción, las que se regirán por una reglamentación especial.
- **Fuente estacionaria grupal:** es toda fuente estacionaria cuyo caudal o flujo volumétrico de emisión es inferior a 1.000 m<sup>3</sup>/hr, bajo condiciones estándar, medido a plena carga.

Este Decreto prohíbe las emisiones de gases y partículas no efectuadas a través de chimeneas o ductos, salvo autorización expresa del Servicio de Salud del Ambiente.

La Tabla N° 9.3, contiene las normas de emisión para fuentes estacionarias puntuales con un caudal mayor de 1.000 m<sup>3</sup>/hr, y con una emisión de material particulado menor de 1 tonelada diaria. La Tabla N° 9.4, presenta los mismos antecedentes, pero para las fuentes grupales.

**Tabla N° 9.3:** Normas de emisión para fuentes estacionarias puntuales.

Fuentes Estacionarias Puntuales (caudal > a 1000 m<sup>3</sup>/hr. con emisión de material particulado < a 1 ton. diaria) (1)

Plazos	Existentes (2)	Plazos	Nuevas (3)
Al 31.12.92	Conc. máx de PTS (4): 112 mg/m <sup>3</sup>	Al 31.12.93	Compensación de un 25% de sus emisiones.
Al 31.12.97	Emáx.día=Caudal(m <sup>3</sup> /hr) 0.000056(kg/m <sup>3</sup> ) 24 (hr/día) (5)	Al 31.12.94	Compensación de un 50 % de sus emisiones (6)
	Conc. máx. PTS(3): 112 mg/m <sup>3</sup> de un 75%	Al 31.12.95	Compensación de sus emisiones.
		Al 31.12.96	Compensación de un 00% de sus emisiones.

- (1) D.S. 4 del Ministerio de Salud.
- (2) son aquellas instaladas o con autorización de instalación aprobada al 02/03/92.
- (3) son aquellas instaladas o con autorización de instalación (puede ser un proceso enteramente nuevo o ampliación de instalación de fuente existente), solicitada con posterioridad al 02/03/92, y serán autorizadas sólo si compensan sus emisiones de partículas de acuerdo a lo señalado en la tabla y sujeto a una concentración máxima de 112 mg/m<sup>3</sup>N.
- (4) medida por muestreo isocinético, en condiciones estándar a plena carga.
- (5) el caudal debe ser medido a plena carga, en condiciones estándar, corregido según exceso de aire (D.S. 32 y 322); se considera para todas las fuentes una operación de 24 hrs. al día de funcionamiento. Cabe destacar que en el caso de las fuentes puntuales nuevas, no está establecido un máximo de emisión por 24 hrs., sino que deben compensar sus emisiones según su propia ecuación de emisiones, a saber:  $E = C_i \cdot Q_i \cdot t_i$ , donde  $C_i$  es la concentración de partículas y debe ser menor a 112 mg/m<sup>3</sup>;  $Q_i$  es el caudal o flujo volumétrico de gases emitidos; y  $t_i$  es el período de funcionamiento.
- (6) De la conjunción de estas dos disposiciones, se concluye que la emisión máxima permisible de partículas para las fuentes puntuales existentes, es la resultante de la siguiente ecuación: Emisión máxima día = Caudal(m<sup>3</sup>/hr)0.000112(kg/m<sup>3</sup>)\*24 hrs., siempre que se compense la diferencia de emisiones producto de la diferencia entre esta ecuación y la ecuación: E. Máx día = Caudal(m<sup>3</sup>/hr)0.000056(kg/m<sup>3</sup>)\*24 hrs.

**Tabla N° 9.4:** Normas de emisión para fuentes grupales.

Fuentes Estacionarias Grupales (caudal < a 1.000 m<sup>3</sup>/hr con emisión de material particulado < a 1 ton. diaria) (1)

Plazos	Existentes (2)	Plazos	Nuevas (3)
Desde 31.12.92	Conc. máx de PTS (4): 112 mg/m <sup>3</sup>	Desde 02.03.92	Conc. máx de PTS (4): 56 mg/m <sup>3</sup>
Desde 31.12.97	Conc. máx de PTS (4): 56 mg/m <sup>3</sup>		

(1) D.S. 4 del Ministerio de Salud.

(2) son aquellas instaladas o con autorización de instalación aprobada al 02/03/92.

(3) son aquellas instaladas o con autorización de instalación (puede ser un proceso enteramente nuevo o ampliación de instalación de fuente existente) solicitada con posterioridad al 02/03/92.

(4) medida por muestreo isocinético, en condiciones estándar a plena carga.

No existen normas de emisión para las grandes fuentes, regulándose en base al cumplimiento de las normas de calidad del aire en el punto de máximo impacto, dependiendo de la zona en que se encuentren, según se indica en Tabla N° 9.5.

### Métodos de Medición

Los métodos de medición utilizados para la verificación y fiscalización de estas normas, aparecen detallados en el capítulo correspondiente.

### Normas de emisión para fuentes móviles

Las normas de emisión para las fuentes móviles aparecen en el Capítulo 7, "Emisiones vehiculares y políticas normativas".

Es importante destacar que las normas de emisión para fuentes móviles consideran dos ámbitos claramente distintos; uno correspondiente a vehículos nuevos (homologación y certificación) y otro para vehículos en uso (revisión técnica). Los valores y métodos son distintos entre sí y no necesariamente comparables. Es así como en forma ideal, la aprobación de una revisión técnica no implica necesariamente que el vehículo en cuestión esté cumpliendo con los niveles de emisión con que fue homologado y certificado, pero su rechazo debería significar que no los cumple.

**Tabla N° 9.5:** Exigencias para las grandes fuentes.

Grandes fuentes (que emitan a la atmósfera cantidades > 3 ton/día de SO<sub>2</sub> o 1 ton/día de material particulado medido en chimenea) (1).

Establecimientos existentes		
Tipo de zona	Disposición	Objetivo
Latente no saturada o no clasificada (2)	Regular sus emisiones de SO <sub>2</sub> y/o Material Particulado	Cumplir con las N. de C. del aire en el pto. máx. impacto.
Saturada (2)	Reducir sus emisiones de SO <sub>2</sub> y/o Material Particulado  Realizar Planes de Desc.  Registrar en forma diaria las emisiones de SO <sub>2</sub> (3) y un registro semestral de material particulado medido en chimenea.  Disponer de un plan de acción operacional para ser aplicado en caso de episodios críticos.	Cumplir con las N. de C. del aire en el pto. de máx. impacto.
Establecimientos nuevos		
Tipo de zona	Disposiciones	
Saturada, saturada, no clasificada	Debe solicitar y obtener una evaluación previa del latente no Servicio de Salud del Ambiente, para obtener la autorización municipal para lo cual se debe presentar un informe técnico.	

2 - 3 Medidas en chimenea o determinadas mediante balance de masa equivalente de azufre.



## CONCLUSIONES. MARCO TEORICO PARA EL FUTURO

De acuerdo a lo señalado en este capítulo, el Decreto Supremo 4, es el primer paso para la regulación de las emisiones de las fuentes fijas, así como lo es el D.S 211 en las fuentes móviles.

Se debe, sin embargo, abordar aún una serie de aspectos conceptuales, legales institucionales y económicos, de manera de lograr una legislación estable y coherente. Esto último debiera hacerse a través del dictado de leyes, para que se produzca el consenso político, indispensable para la estabilidad del sistema. Estos diferentes aspectos pueden dividirse en:

### CONCEPTUALES

El D.S.4, plantea regular las emisiones de partículas de las fuentes fijas, no incluyendo a las fuentes móviles, residencias y fuentes naturales (calles de tierra, por ejemplo). Esto es de especial importancia, ya que el aporte, al nivel de contaminación por partículas en el aire ambiente, de las fuentes fijas es sólo de alrededor del 30%. Al incluir estas fuentes, se podría estudiar un sistema de transacción de licencias.

La regulación se efectúa a nivel de partículas totales, sin discriminar las de tamaño menor a  $10\mu$ , que son las que producen mayor daño a la salud de las personas. Esto es especialmente importante, si se considera que para las partículas menores a  $2,5\mu$ , la responsabilidad recae fuertemente en la combustión de motores diesel.

La dimensión temporal y duración de las licencias, se refiere a si la licencia será diferenciada por estación del año y por el período durante el cual se autoriza a emitir lo establecido en ella. Tal como está ahora, el sistema está diseñado para una condición climática adversa, desaprovechando los "espacios de emisión" que pueden producirse en situaciones climáticas más favorables (por ejemplo, en verano). Esto es importante, ya que permitiría disponer de cupos de emisión a ser licitados para el verano.

Definición del dominio geográfico al cual se aplican las licencias. La implementación de un sistema de licencias de emisiones transables, implica el establecimiento de restricciones para la instalación de nuevas actividades emisoras. Esto lleva a la conclusión de que se deben definir y controlar las situaciones de borde, dado que las actividades nuevas se pueden instalar en el límite fuera del área, influyendo con sus emisiones en el área regulada.

El D.S. 211, se refiere a los vehículos livianos, faltando toda la regulación para los vehículos pesados.

### INSTITUCIONALES Y LEGALES

En este punto se plantearán los principales aspectos específicos derivados de la ley de bases del medio ambiente, en lo que respecta a la contaminación del aire.

La ley de bases define contaminante y medio ambiente libre de contaminación. Las definiciones utilizadas implican que cualquier alteración del medio con respecto a su estado natural es contaminación. A juicio del autor, esto es incorrecto y debería ser modificado.

La ley define norma primaria y secundaria de calidad ambiental y zona latente y saturada. Estas definiciones forman parte básica de cualquier acción de gestión que se desee implementar.

El sistema de evaluación de impacto ambiental amarra la evaluación del impacto producido por la contaminación a las normas nacionales, o en su defecto cuando éstas no existan, a las internacionales que defina el reglamento. Esta situación implicará un grado importante de discusión para decidir los procedimientos necesarios para la homologación de normativas de otros estados.

La ley especifica que las normas primarias deberán ser promulgadas por el Ministro Secretario General de la Presidencia y por el Ministro de Salud. Estas deberán ser dictadas de acuerdo a un reglamento y definirán los niveles que originan situaciones de emergencia. Para la promulgación de las normas secundarias, además de la firma del Ministro Secretario General de la Presidencia, deberán llevar la firma del ministro sectorial que corresponda.

La ley especifica los procedimientos a seguir para el dictado de planes de prevención (zonas latentes), de descontaminación (zonas saturadas) o de regulaciones especiales de emergencia. En lo que respecta a estos planes, se deberán dictar reglamentos que regulen estas actividades y, más importante aún, una ley que regule el uso de licencias de emisión transables, que están siendo utilizadas de hecho.

Por último, cualquier sistema de control de la contaminación requiere, para ser efectivo, de una fiscalización eficiente por parte del Estado. Al respecto, es imprescindible que el Estado refuerce las instituciones encargadas de la fiscalización establezca las sanciones correspondientes. Esta será la última prueba en relación al compromiso del Estado con el control de la contaminación, tanto en Santiago como en el resto del país. Otro aspecto importante complementario a lo anterior, se refiere a la capacidad técnica en la evaluación de las emisiones, en la que el Estado deberá disponer de un laboratorio de referencia, tanto para las fuentes fijas como móviles.

Cabe señalar, que para las fuentes móviles nuevas, no existe ninguna instancia en el país que permita evaluar las emisiones, según lo indica el D.S. 211. La CEDRM está desarrollando un proyecto que permitirá disponer, en el corto plazo, de un laboratorio de evaluación de emisiones. Para las fuentes fijas, existen empresas privadas que miden emisiones, pero el Estado no dispone de capacidad de control de éstas. La CEDRM, en este caso, también está desarrollando un proyecto para contar con un laboratorio de referencia.

## ASPECTOS ECONOMICOS

Es indispensable, para el buen funcionamiento del sistema, que exista un mercado competitivo de derechos y, por lo tanto, un precio.

Se debe estudiar el tratamiento tributario que se le dará a la adquisición o venta de licencias, así como a las ganancias o pérdidas de capital que se deriven.

Finalmente, cabe señalar, que un sistema de licencias de emisión transables es muy eficiente para controlar las emisiones a nivel global, pero no maneja situaciones puntuales que puedan ocurrir. Estas situaciones pueden afectar negativamente un área específica de la ciudad. Para esto es indispensable identificar estos "hot spots", mediante sistemas de monitoreo (estatales o privados).



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Desarrollo de un sistema de permisos transables para la Región Metropolitana, Alejandro Cofré, Raúl O'Ryan. Taller de Ingeniería de Sistemas, julio 1992.
- El caso de Santiago: Análisis del Decreto Supremo 4. Seminario "El uso de permisos de emisión transables en el control de la contaminación atmosférica", Ricardo Katz. Centro de Estudios Públicos, junio 1992.
- El Decreto Supremo 185. Seminario "El uso de permisos de emisión transables en el control de la contaminación atmosférica", Jaime Solari. Centro de Estudios Públicos, junio 1992.
- Política de control de la contaminación atmosférica en Chile. Puntos de referencia, N° 94, mayo 1992. Ricardo Katz. Centro de Estudios Públicos, mayo 1992.
- Proposición de un nuevo índice de calidad del aire. Unidad Coordinadora Proyecto BID 469/OC-CH. Intendencia Región Metropolitana, abril 1988.



CONTAMINACION ATMOSFERICA DE SANTIAGO  
ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES



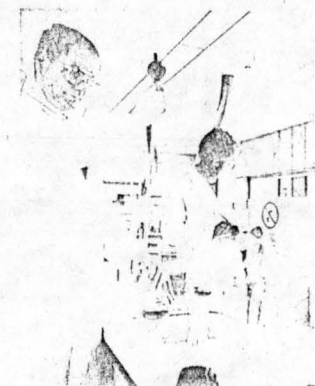
*PARTE II*

**O**PCIONES DE SOLUCION PARA  
EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACION  
ATMOSFERICA DE LA CIUDAD

*CAPITULO 10*

*CAPITULO 11*

*CAPITULO 12*



*CAPITULO 10*  
**LAS EXPERIENCIAS DE OTROS PAISES**  
*Juanita Gana Q.*

<i>Las experiencias de otros países</i>	293
<i>El caso de Sao Paulo, Brasil</i>	294
<i>El caso de la ciudad de México</i>	303
<i>Alemania y el caso de North Rhine-Wetfalia</i>	315
<i>Suecia: el caso de Estocolmo</i>	324
<i>Estados Unidos y el caso Denver</i>	329
<i>Referencias bibliográficas</i>	337





## LAS EXPERIENCIAS DE OTROS PAISES

[La presente revisión tiene por objeto entregar antecedentes que permitan, media el examen de dichas experiencias, identificar políticas, estrategias, programas e instrumentos que puedan ser utilizados en el caso de la contaminación atmosférica Santiago.]

[Para esta revisión hemos elegido a Brasil, México, Alemania, Suecia y Estados Unidos.] Todos ellos estuvieron presentes en el Taller de Contaminación, exponiendo sus casos, y este capítulo se basa de modo importante en esas presentaciones.

La situación de países como Estados Unidos o Alemania presenta similitudes y diferencias con las de México, Brasil y Chile. Las similitudes se acentúan cuando retrocedemos en el tiempo y nos situamos décadas atrás, cuando el nivel de contaminación, originado por factores más o menos similares a los que se encuentran presentes en México, Sao Paulo o Santiago, comenzó a hacer crisis [El nivel de actividad industrial, el tamaño del parque vehicular, la densificación de las ciudades, factores que experimentaron un crecimiento particularmente notable en dichas economías a mediados de este siglo, comenzaron a hacer evidente la capacidad limitada del ambiente para absorber los desechos originados por la actividad productiva doméstica.]

[Las grandes diferencias se encuentran no solamente en el hecho de que países como México o Brasil recién comienzan a consolidar sus políticas de protección del medio ambiente, como producto del desfase en el nivel de crecimiento de sus economías, sino también en los niveles de ingreso y su distribución, que corresponden a países que aún se encuentran en la fase de desarrollo.] Esto significa que prioridades ambientales que comienzan a plantearse con urgencia, compiten con otras igualmente importantes en el terreno de la satisfacción de las necesidades básicas de la población. En tales circunstancias, enfrentar los costos que, inevitablemente, lle-

- **Juanita Gana Quiroz**  
Ingeniero Civil Industrial,  
Universidad de Chile.  
Profesor Adjunto, Departamento  
de Ingeniería Industrial,  
Universidad de Chile.  
Hubert H. Humthrey Fellow, Colorado,  
School of Mines.  
Magister en Gestión Pública,  
Universidad de Harvard.

aparejados la prevención y el control de la contaminación, presenta complejidades adicionales.

[Otra diferencia importante, que en parte compensa las dificultades que puede plantear la protección del medio ambiente en un país en vías de desarrollo, es que el diseño e implementación de políticas puede apoyarse en la experiencia de otros países que iniciaron el camino hace ya muchos años. Los procesos de prueba y error por los que han atravesado los países desarrollados pueden ser aprovechados, reduciendo el costo de las equivocaciones, aumentando así la efectividad y eficiencia de las políticas ambientales.]



## EL CASO DE SAO PAULO, BRASIL

### CARACTERIZACION DE LA SITUACION

[La magnitud del crecimiento de la población, de la industria y del transporte, más las condiciones climáticas y meteorológicas en ciertas áreas de Brasil, han significado grandes problemas de contaminación atmosférica.]

[La Región Metropolitana de Sao Paulo (RMSP), comprende 38 municipios y cubre una extensión de 8.000 km<sup>2</sup>. Tiene una población aproximada de 17 millones de habitantes y su tasa de crecimiento es abismante: cerca de 500 mil personas llegan a establecerse a la RMSP cada año (W. Lazzarini, 1991). Las industrias bordean las 40.000 y generan cerca del 50% del producto industrial de Brasil, y los 4 millones de vehículos que circulan por la RMSP constituyen cerca del 30% de los vehículos del país.]

[La RMSP se encuentra afectada por diversos tipos de problemas de contaminación, pero sin duda uno de los más apremiantes es el de la contaminación del aire. Esta, regularmente, sobrepasa las normas aceptadas de calidad del aire.]

[Anualmente, se emiten sobre 2 millones de toneladas de diversas sustancias contaminantes. La composición de esa masa de contaminantes se encuentra en la siguiente Tabla.]

✓ Tabla N° 10.1: Niveles de emisión de contaminantes

Contaminante	Emisiones (ton)	Por persona (g/por persona)
CO	1.391.000	250
NOx	217.000	35
HC	233.000	38
SOx	122.000	20
Partículas	77.000	10

Fuente: Lazzarini, Walter (1991).

De estas sustancias, las más críticas son las partículas, el CO y el SO<sub>2</sub>. En cuanto a las fuentes de origen de dicha contaminación, la siguiente Tabla proporciona una visión de la situación actual.

✓ Tabla N° 10.2: Distribución porcentual de las sustancias contaminantes según origen

Contaminante	Vehículos	Industria	Otros
CO	94	6	
NOx	92	8	
HC	89	11	
SOx	64	36	
Partículas	40	10	50

Fuente: Lazzarini, Walter (1991).

Como se puede observar, el principal responsable de la contaminación es el transporte, en tanto la industria hace una contribución significativa sólo en el caso de SOx.

[En cuanto a los distintos tipos de transporte, los vehículos que emplean gasolina son los que realizan la mayor contribución a las emisiones de CO y HC, en tanto los vehículos que utilizan petróleo diesel son los principales responsables de la contaminación por NOx, SO<sub>2</sub> y partículas (V. Rivelli, 1990).]

[En el caso de las industrias, es interesante constatar que de las 40 mil industria que operan en la RMSP, 700 son responsables; aproximadamente, del 90% de la contaminación de origen industrial (W. Lazzarini, 1991).]



Las industrias y el transporte hay que agregar las fuentes no convencionales, que constituyen el principal origen de la contaminación por partículas. Estas incluyen obras civiles, calles no pavimentadas, terrenos eriazos, etc.]

## POLITICAS APLICADAS E INSTITUCIONALIDAD

El marco legal está dado por la Ley 6.938 del 31 de agosto de 1981, que formula y define la Política Nacional del Medio Ambiente del Brasil; por el Decreto 88.351 de junio de 1983, que define la acción normativa del Estado; por la Resolución 1 del Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) de 1986, que establece la obligatoriedad de la evaluación de impacto ambiental, define los instrumentos y orienta la planificación nacional, regional y sectorial] y por la Ley 7.486 de 1986, que establece el Programa de Acción Gubernamental que explicita objetivos, directrices, prioridades y recursos para implementar la política.

En cuanto a los reglamentos federales específicamente dirigidos a controlar la contaminación del aire, el primero de ellos data de 1976: el Reglamento 231 que establece las normas nacionales de calidad del aire. Posteriormente, en 1980, se dictaron dos nuevos reglamentos. El primero de ellos establece las normas para las emisiones de humo negro de vehículos diesel, en tanto el segundo establece las normas para la contaminación acústica.]

A nivel estatal, las leyes y reglamentos son antiguos, si bien la primera ley en abordar el problema de forma más sistemática fue la Ley 997, dictada en 1976. Esta ley define las orientaciones generales para la prevención y el control de la contaminación del aire en el estado de Sao Paulo: [establece las normas de calidad del aire y las normas de emisión de partículas,  $\text{SO}_2$  y sustancias olorosas; define políticas específicas para controlar la contaminación del aire en diferentes zonas del Estado; desarrolla un plan para evitar episodios críticos; se pronuncia sobre el uso de los suelos y determina áreas de protección ambiental; y establece la obligatoriedad de realizar estudios de impacto ambiental] (Alfred Szwarc y Eduardo Licco, 1989).

La estrategia utilizada ha sido determinar el nivel de contaminación del aire; elaborar un inventario de las emisiones; determinar las normas de calidad de aire a satisfacer; establecer el grado necesario de reducción de las emisiones; definir las normas de emisión o desempeño; precisar los planes de control y los plazos para alcanzar las metas, en forma negociada con los representantes de las industrias; y poner en práctica sistemas de control] (J.B. Galvao, 1987).

Tabla N° 10.3: Normas de calidad del aire

Contaminante	Norma
Partículas (1)	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)*
$\text{SO}_2$	80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas)*
CO	10.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8 horas)* 40.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 hora)*
Ozono	160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 hora)*

Fuente: Swarc, A. y E. Licco (1989).

(1) Corresponde a partículas totales en suspensión.

(\*) No deben ser sobrepasados más de una vez al año.

[El Programa de Control de Fuentes Fijas es el más antiguo y, a través de él, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB), ejerce su acción fiscalizadora sobre las fuentes fijas de contaminación. Este programa controla humo negro, partículas y  $\text{SO}_2$ ]

[El programa de control de humo negro es la componente de mayor antigüedad. Está basado en la evaluación colorimétrica del humo emitido por los procesos de combustión y está orientado a fiscalizar una de las causas principales de la contaminación, la combustión incompleta. Para estos efectos, la CETESB desarrolla acciones de control periódico en todas las industrias de la RMSF.]

[El programa de control del material particulado producido por fuentes fijas se inició en 1979, con el objeto de reducir las emisiones industriales en un 70%, en el plazo de 5 años. Para ello, las 162 principales fuentes existentes de contaminación, responsables del 96% de las emisiones de partículas, fueron obligadas a adoptar tecnologías de control. Las ampliaciones y nuevas industrias tuvieron que utilizar la mejor tecnología de control disponible (95% o más de eficiencia de control), lo mismo que aquellas ubicadas en zonas de incumplimiento de las normas (W. Lazzarini, 1991; V. Rivelli, 1990; A. Szwarc y E. Licco, 1989).]

Gracias a esta estrategia se obtuvo una reducción importante en la emisión de partículas por parte de la industria. No obstante, todavía existen zonas en las cuales la norma es sobrepasada.

[El programa de control de las emisiones de  $\text{SO}_2$  se inició en 1982, con una meta de reducción del 80% de las emisiones industriales, en un plazo de 5 años, es decir, este programa se propuso llegar a un nivel de emisiones anuales de 32.000 toneladas en 1987. En 1990, el nivel de reducción alcanzado era del 86%. Para lograrlo, se limitaron las emisiones de fuentes fijas a 20 kg de  $\text{SO}_2$  por tonelada métrica de combustible quemado y a un máximo de 7 toneladas métricas de  $\text{SO}_2$  al año, en el caso



[de fuentes nuevas (A. Szwarc y E. Licco, 1989)] [Especial énfasis se puso en los 360 mayores consumidores de petróleo (W. Lazzarini, 1991). Asimismo, se hizo un esfuerzo por sustituir combustibles, reducir el contenido de azufre en el petróleo y se instalaron sistemas de control del  $\text{SO}_2$ . Un elemento que jugará un gran rol a futuro es el uso de gas natural. Brasil cuenta con grandes reservas, sin embargo, el gas natural constituye apenas un 2% del volumen total de combustibles empleados.]

[El programa de control de fuentes fijas contempla además el otorgamiento de permisos de contaminación para aquellas establecidas en Sao Paulo: el Sistema de Licenciamiento de Fuentes de Contaminación.]

[Las empresas reincidentes en el incumplimiento de las normas están sujetas a la aplicación de multas diarias. Si sobrepasan los 30 días y el problema no es solucionado, la CETESB está autorizada para clausurar la empresa. Esto no ha sido necesario hasta la fecha (Horizontes Urbanos, 1990)]

El Programa de Control de Emisiones de Automotores (PROCONVE), fue diseñado para abordar el problema de las emisiones vehiculares. Este programa iniciado en 1986, con la promulgación de la Resolución 18 de la CONAMA, [pretende lograr la reducción gradual de la emisión de contaminantes con un calendario para vehículos livianos y pesados. El programa está basado en la experiencia de países desarrollados, como Estados Unidos y Japón, y su adaptación ha involucrado la participación de la industria automotriz y otras partes interesadas] Establece metas para la industria automotriz que, de no ser cumplidas, revocan la autorización para la fabricación de vehículos nuevos. Sao Paulo, lugar por donde circula el 30% de los vehículos que operan en todo Brasil, es precisamente el centro de atención de este programa (W. Lazzarini, 1991).

[En el caso de vehículos livianos, el programa comprende 3 etapas, las que se exponen en la Tabla siguiente]

✓ Tabla N° 10.4: Programa de reducción de emisiones para vehículos livianos

	1989*	(g/km) 1992	1997
CO	24	12	2
HC	2,1	1,2	0,3
NOx	2,0	1,4	0,6
Aldehídos**	0,15	0,03	

Fuente: Lazzarini, W. (1991).

(\*) En el caso de vehículos utilitarios, el plazo de cumplimiento fue 1992.

(\*\*) En el caso de vehículos que utilizan alcohol.

Para alcanzar estas normas, la industria automotriz debió utilizar inyección electrónica de combustible e incorporar convertidores catalíticos a partir de 1992.

En el caso de los vehículos pesados, o motores con ciclo diesel, el programa establecía que en 1987, la relación entre el humo negro emitido y la cantidad de aire utilizada en la combustión debía ser 2,5. A partir de 1988, los autobuses urbanos nuevos tendrían que emplear control total de los gases del cárter, uso obligatorio de la licencia de acuerdo a la configuración del motor, y sellos en los dispositivos regulables de la bomba inyectora. En 1989, todos los vehículos diesel deberían haber cumplido con estas normas. Además, se establecieron las siguientes normas de emisión:

✓ Tabla N° 10.5: Programa de reducción de emisiones para vehículos pesados.

	(g/kwh)	1993	1995
CO		11,2	
NOx		18	14,4
HC		2,8	

Fuente: Lazzarini, W. (1991).

[Los gobiernos estatales y municipales son los encargados de desarrollar programas de inspección para garantizar la eficacia de los sistemas de control de emisiones y promover el mantenimiento de los motores y vehículos]

[En la medida en que las normas para vehículos tanto livianos como pesados se cumplan, se espera una reducción del 60% de la contaminación atmosférica en la RMSP (W. Lazzarini, 1991)]

Las medidas de control de las emisiones de los vehículos livianos serán complementadas a futuro con un mayor desarrollo del sistema de transporte público, como forma de ofrecer una alternativa al uso del vehículo particular. El sistema actual de buses, metro y trenes no da las garantías necesarias para satisfacer las necesidades de la población. A futuro se espera realizar importantes inversiones en esta área.

Aparte de controlar las emisiones de los vehículos nuevos, también se controlan las emisiones de los vehículos diesel antiguos, especialmente el humo negro. Los que sobrepasan un nivel de opacidad mayor de 2, son notificados, y en caso de reincidencia son multados. Para los efectos de la fiscalización, la CETESB es apoyada por los servicios de la policía de tránsito.

[Esta fiscalización es complementada con campañas de información orientadas a los conductores sobre la conveniencia de mantener los motores diesel regulados.]



[Por otra parte, las compañías de transporte deben presentar un certificado de humo negro ante el Consejo Nacional de Petróleo, para poder adquirir combustible. Este certificado es emitido por la dependencia estatal de calidad ambiental.]

[Finalmente, las empresas de transporte colectivo y de carga mantienen programas propios de autofiscalización.]

Los programas permanentes se complementan con programas especiales para enfrentar las condiciones invernales y las situaciones críticas. Para esto, la CETESB desarrolla un programa destinado a prevenir episodios críticos durante el invierno: el Plan de Acción de Emergencia para Episodios Críticos de Contaminación del Aire (Decreto 8468). Este programa, en aplicación desde 1976, opera desde el 1 de mayo al 31 de agosto. Comprende una serie de acciones preventivas con el objeto de evitar el empeoramiento de los niveles de concentración de las sustancias contaminantes, debido a condiciones meteorológicas desfavorables a la dispersión de las mismas.

[En el caso de las fuentes fijas, se aumenta el grado de fiscalización de las industrias, y puede llegar a exigirse, si las condiciones así lo requieren, la disminución de los niveles de producción. Se controlan todos los contaminantes, pero se pone énfasis en partículas,  $\text{SO}_2$  y humo negro.]

[Paralelamente, se exige el uso de petróleo con un contenido de azufre inferior al 1%. En circunstancias normales, este contenido puede alcanzar hasta 5%. Para ello se coordinan acciones con las compañías productoras y distribuidoras de combustibles (Petrobras y CNP), a fin de asegurar un adecuado abastecimiento.]

[Además, se cuenta con un Plan de Emergencia para Episodios Críticos de Contaminación del Aire. Este plan, establecido en 1976, tiene por objeto enfrentar episodios críticos de contaminación, y asegurar que tanto el gobierno estatal como las municipalidades, organismos privados y la comunidad, estén preparados para prevenir los eventuales riesgos de salud.]

[Un episodio crítico es definido como un período de "altas concentraciones de sustancias contaminantes en la atmósfera en cierto período de tiempo, producto de condiciones meteorológicas desfavorables para su dispersión".]

[Para enfrentar estos episodios se establecieron niveles de atención, alerta y emergencia. La declaración de cualquiera de estos niveles considera tanto las concentraciones de contaminantes en el aire como las condiciones meteorológicas previstas.] En la Tabla N° 10.6, se indican los criterios utilizados para identificar dichos niveles.

[En cuanto a las medidas, en el nivel de atención, se procede a solicitar la colaboración de los conductores de vehículos para que eviten su uso innecesario. En el nivel de alerta se restringe el uso de vehículos y el funcionamiento de las industrias.] Se complementa con acciones específicas como el regado de áreas generadoras de grandes cantidades de partículas (por ejemplo, obras civiles). Finalmente, en el nivel de emergencia, el más extremo, se prohíbe la circulación de vehículos en las áreas afectadas, así como el funcionamiento de fuentes industriales. Se toman acciones complementarias.]

Durante estos episodios se presta especial atención a las fuentes no convencionales generadoras de partículas y humo negro. Estas fuentes son tanto obras civiles como ciertos servicios públicos, actividades como la quema de hojas y otros. Para esto, la CETESB mantiene un registro de las principales fuentes y sus responsables, quienes deben desarrollar planes de emergencia para controlar este tipo de emisiones en caso de enfrentarse un período crítico. Si esto sucede, los responsables de las fuentes, así como la policía, el cuerpo de bomberos y otros, actúan en conjunto bajo la coordinación de CETESB.

✓ Tabla N° 10.6: Criterios de episodios agudos en el Estado de Sao Paulo

Contaminante	Atención	Alerta	Emergencia
$\text{SO}_2$ (24 horas)	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	2.100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Partículas (24 horas)	375 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	625 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	875 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$\text{SO}_2$ *Partículas (24 horas)	65.000	261.000	393.000
CO (8 horas)	17.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	34.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	46.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Ozono (1 hora)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1.200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: Swarc, A. y E. Licco (1989).

Como parte de la tarea de fiscalización, la CETESB realiza el monitoreo de la calidad del aire. Las primeras evaluaciones fueron hechas en 1965, siguiendo los procedimientos establecidos por la Organización Panamericana de la Salud. Pero sólo en 1981, se llegó a establecer una red de vigilancia continua, la que comprende para la RMSB, veinticinco estaciones automáticas fijas y dos móviles. Esta red mide los niveles de concentración de partículas,  $\text{SO}_2$ , CO,  $\text{NO}_x$ , HC y ozono. Esta información permite ir revisando la adecuación de los programas de control y la necesidad de implementar programas de emergencia en caso que ello sea necesario.

La incorporación de la población a las estrategias llevadas a cabo por CETESB ha sido un punto destacable. [Mediante reuniones, seminarios y boletines informativos, se entrega información y se motiva la participación de la comunidad.] La CETESB está en contacto permanente con las autoridades locales y con el público acerca de las actividades realizadas y los resultados obtenidos (Horizontes Urbanos 1990). [Además se mantiene un sistema de tableros electrónicos en las calles que



registrar la calidad del aire en avenidas importantes de Sao Paulo, y los índices de calidad del aire son publicados diariamente en los periódicos de mayor circulación en la RMSP.]

En cuanto a la institucionalidad, en 1975, se creó la Secretaría Especial del Medio Ambiente (SEMA). Pero se estima que los instrumentos necesarios para implementar una política medioambiental se crearon en 1981, con el dictado de la Ley 6.938 y la creación del Sistema Nacional del Medio Ambiente (SISNAMA).

El SISNAMA define que el gobierno federal, los estados y los municipios son los encargados de establecer las directrices para velar que la acción del hombre sobre el medio ambiente no arriesgue la calidad ambiental para las generaciones actuales y futuras.

Junto con el SISNAMA, se creó el Consejo Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), organismo que establece las normas y regulaciones de la política ambiental del Brasil.

El organismo de creación más reciente, en 1985, es el Ministerio de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Su función es el fomento directo y la prestación de apoyo técnico, institucional y financiero a los organismos estatales y municipales.

A nivel de cada estado, los gobiernos respectivos han desarrollado sus propios aparatos a través de secretarías y departamentos ambientales y consejos estatales del medio ambiente. Algo parecido ha sucedido a nivel de los municipios.

En el caso del Estado de Sao Paulo, la Compañía de Tecnología de Saneamiento Ambiental (CETESB), dependiente de la Secretaría de Medio Ambiente, ha sido fundamental en la implementación de los reglamentos y programas. Si bien el papel que jugó durante la década de 1970, fue más bien débil, el compromiso del gobierno que asumió en 1983, permitió darle a CETESB el poder, las atribuciones y los recursos necesarios para una gestión efectiva.

Las funciones de la CETESB son la implementación de reglamentos y programas, la fiscalización del cumplimiento de las normas y la realización de investigación de apoyo. Además, y como parte de su estrategia, la CETESB se ha convertido en un órgano de difusión de información e incorporación de la comunidad, lo que ha sido central en el logro de los resultados obtenidos a la fecha.

Para desarrollar su tarea, la CETESB cuenta con alrededor de 2.000 empleados y con laboratorios propios.

## RESULTADOS Y TENDENCIAS

[Se estima que se han destinado 33 millones de dólares a solucionar el problema de la contaminación atmosférica.]

[Uno de los mayores logros ha sido la reducción de las emisiones de  $\text{SO}_2$ . Actualmente, no habría zonas de incumplimiento de las normas de calidad del aire.]

[La mejoría lograda es fruto, en parte del programa de control regional implementado.]

[a partir de 1982, el uso de combustibles con menor contenido de azufre y, eventualmente, de los períodos de menor actividad económica.]

Asimismo, las emisiones de partículas han disminuido notablemente, gracias a la implementación del programa de control de fuentes fijas. Este ha logrado la reducción de las emisiones en un 70%, en los primeros cinco años. Es decir, en 1985, se logró la meta de reducir las emisiones de material particulado a 47 mil toneladas métricas por año (W. Lazzarini, 1991). Hoy en día se estima que, si bien todavía hay zonas que muestran índices por sobre las normas de calidad del aire, el programa ha alcanzado un 99% de cumplimiento (V. Rivelli, 1990).

En el caso de sustancias contaminantes como el CO, el  $\text{NO}_x$  y los HC, el uso de etanol como combustible en los vehículos ha contribuido a cierta mejoría, si bien los índices todavía son altos y constituyen motivo de preocupación para la autoridad.

Un indicador relevante en cuanto al éxito alcanzado en el control de la contaminación atmosférica es el número de situaciones de alerta y emergencia. En el caso de la ciudad de Cubatao, el área de mayor contaminación de la RMSP, se detecta una reducción significativa entre el año 1984 y 1989. A partir de 1986, simplemente no se han vuelto a registrar situaciones de emergencia, en tanto las situaciones de alerta disminuyeron de doce en 1984, a cuatro en 1988, y ninguna en 1989 (V. Rivelli, 1990).

Se espera avanzar en el establecimiento de normas complementarias de calidad del aire, en normas nacionales de emisiones de fuentes estacionarias, en el desarrollo de una red de vigilancia a nivel nacional, en el establecimiento de regiones de control y de un sistema nacional de permisos.

Finalmente, cabe señalar que los problemas más importantes con que tropezó el mejoramiento de la calidad del aire fueron la falta de voluntad política, cuestión que fue superada a fines de la década de los '80, y el desarrollo de una adecuada capacidad de fiscalización, lo que incluye la disponibilidad de personal idóneo.



## EL CASO DE LA CIUDAD DE MEXICO

### CARACTERIZACION DE LA SITUACION

[La ciudad de México presenta muchas similitudes con la ciudad de Santiago. Aparte de ser la capital de un país latinoamericano en vías de desarrollo, las características de su crecimiento y de su ubicación geográfica las asemejan en muchos sentidos.]

[El Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM), incluye las 16 delegaciones del Distrito Federal y 17 municipalidades del Estado de México ubicadas en torno al Distrito Federal. Con una población cercana a los 15 millones de



[Habitantes, más de 2,7 millones de vehículos circulando por sus calles y 42.000 establecimientos industriales y comerciales, el AMCM ha experimentado una expansión durante las últimas décadas que ha sobrepasado con creces la capacidad de la ciudad y de su ambiente (F. Guzmán, 1992).]

Entre otros problemas, la ciudad de México enfrenta niveles severos de contaminación atmosférica. Estos han derivado del estilo de crecimiento económico del país, y se han acentuado debido a las características geográficas y climáticas especiales de la ciudad.

[En efecto, el problema de la contaminación atmosférica en el caso de México se ve fuertemente agravado por su situación geográfica, la que otorga a las condiciones meteorológicas una importancia central, al igual que en Denver o Santiago. En consecuencia, los índices de contaminación pueden variar significativamente de un día a otro, debido, exclusivamente, a condiciones meteorológicas.]

[La ciudad de México se encuentra a 2.300 metros sobre el nivel del mar, en la base de una cadena de altas montañas, algunas de las cuales alcanzan los 5 mil metros de altura. Por una parte, las montañas impiden la adecuada ventilación de la zona. Por otra, la altitud, las altas presiones y, nuevamente, la topología del valle, crean condiciones ideales para la ocurrencia de inversiones termales durante 265 días al año en promedio, entre las 5 y las 10 de la mañana, fenómeno que dificulta aún más la dispersión de la contaminación. Durante el verano, el problema es compensado en parte gracias a las lluvias.]

[La altura a la que se encuentra la ciudad de México no sólo contribuye al entrapamiento de las sustancias contaminantes sino también a la generación misma de la contaminación. Debido a ella, la atmósfera de el AMCM presenta una deficiencia de 23% de oxígeno.]

[Como señaláramos, hay una intensa actividad económica en el AMCM. Más del 40% del producto de México es creado en esta zona (F. Guzmán, 1992). Los inventarios de emisiones registran sobre 4.000 establecimientos industriales, considerados los más contaminantes. De ellos, el 17,9% está constituido por empresas relacionadas con la producción y elaboración de minerales y metales; el 20,9% son empresas pertenecientes a la industria química; y el 11,5% a la industria petroquímica (CEPAL, 1991,b).]

[Además, los inventarios identifican 12.000 establecimientos comerciales o de servicios que involucran procesos de combustión (restaurantes, panaderías, hoteles, baños públicos, etc.) y fuentes contaminantes asociadas al uso de tintas, solventes y limpieza en seco (F. Guzmán, 1992). De ellos, el 29% son tortillerías, el 27,5% tintorerías y el 14,5% panaderías (CEPAL, 1991,b).]

[En cuanto al sistema de transporte, éste incluye 2,6 millones de vehículos privados, 56.500 taxis, 7.500 buses, 54.500 vehículos colectivos de menor tamaño, 196.000 camiones a gasolina, 60.000 camiones diesel y facilidades de transporte aéreo y de ferrocarril (F. Guzmán, 1992). Cerca de 30 millones de viajes son efectuados diariamente en el AMCM.]

La impresionante actividad económica que se desarrolla en el AMCM, consume diariamente alrededor de 42 millones de litros de combustibles, los que se desglosan en 20 millones de litros de gasolina y petróleo diesel, 1,8 millones de litros de petróleo y 340 millones de pies cúbicos de gas natural (F. Guzmán, 1992). Los principales consumidores son el sector del transporte, con un 53% del consumo total, y el sector industrial con un 43%. Los vehículos privados consumen el 20% del total de la gasolina. El consumo doméstico comprende un 11% del consumo total (Lacy Tamayo, 1992).

[No debería sorprender que semejante tamaño de población y nivel de actividad económica lleven aparejados un nivel de contaminación atmosférica significativo. En efecto, México se considera la ciudad más contaminada del mundo (CEPAL, 1991,b). Se estima que cada año se emiten cerca de 4,3 millones de toneladas de contaminantes (Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, 1992).]

[De acuerdo a diferentes fuentes, los principales problemas que se enfrentan son los altos niveles de ozono y de partículas. Si bien el primero no es visible, es quizá más grave en términos de sus efectos sobre la salud.]

Los índices de ozono se encuentran con frecuencia por sobre las normas de calidad ambiental, con niveles más altos entre diciembre y marzo. Incluso, durante los últimos años, ha sido posible observar aumentos en los índices de concentración de ozono, tanto en términos de los niveles máximos registrados como del promedio a diferencia de los otros contaminantes que han logrado mantenerse bajo la norma en promedio anual.

[En cuanto a las partículas, al producir la degradación de la visibilidad, es un tipo de contaminación que resulta particularmente evidente para la población. Las partículas encuentran su origen tanto en la producción industrial y en las emisiones de vehículos como en fuentes naturales.] Por ejemplo, es posible apreciar mayores índices de contaminación por partículas en zonas agrícolas en período de sequía. Antiguos lagos salados, hoy secos, cuyo polvo es arrastrado por los vientos o las vías sin pavimentar, son también causantes del nivel de partículas en el aire del AMCM. Y aún cuando en forma directa no constituya una fuente de contaminación, el proceso de deforestación que ha acompañado la expansión económica del área, también ha contribuido.

[El nivel de HC, no ha concitado el mismo nivel de preocupación que el de ozono o el de partículas, en parte por falta de información respecto a sus niveles. Sin embargo, de acuerdo a campañas de medición recientes, éste ha mostrado ser particularmente alto, e incluso duplicaría los máximos observados en el sur de California (F. Guzmán, 1992).] Aparte de constituir un problema en sí mismo, cabe recordar que el nivel de HC tiene incidencia directa sobre los niveles de contaminación por ozono. Se estima que los principales responsables de la contaminación por HC son la gran flota de vehículos que circula a diario por el AMCM y la industria (F. Guzmán, 1992).



En cuanto al NO<sub>x</sub>, sus niveles también revisten importancia por su impacto sobre el ozono. Las emisiones de NO<sub>x</sub> tienen origen fundamentalmente en las emisiones vehiculares.

Otro de los contaminantes sobre los cuales se ha mantenido control es el CO. Desafortunadamente, si bien hasta hace algunos años sobrepasaba la norma ocasionalmente (alrededor de 10 días al año), a partir de 1990, se aprecia un aumento importante en el número de violaciones anuales (F. Guzmán, 1992).

También se controlan las emisiones de SO<sub>2</sub>, provenientes fundamentalmente de las plantas generadoras de energía eléctrica.

Por último, la presencia en el aire de metales pesados y otras sustancias tóxicas, también constituye un problema ambiental en el AMCM. Se le ha dado especial énfasis al plomo.

A continuación, y como punto de referencia, se entregan cifras para los volúmenes de emisión correspondientes a los comienzos de los años de la década del '80. Sin embargo, deben tomarse con precaución ya que el tema de las mediciones ha sido polémico.

Tabla N° 10.7: Emisiones en el Area Metropolitana de la Ciudad de México

(Toneladas por año)	
Partículas	339.721
SO <sub>2</sub>	306.408
CO	3.054.081
HC	488.056
NO <sub>x</sub>	74.594
Total	4.262.500

Fuente: IEPES, 1982, citado en Bravo, H. y R. Torres (1989).

[Se estima que, en términos globales, cerca del 80% de la contaminación proviene de vehículos (Lacy Tamayo, 1992). La contribución de la industria al volumen de sustancias contaminantes emitidas en el AMCM es sólo del 11% al 13%, aunque, en términos de toxicidad, su contribución es mayor (CEPAL, 1991,c).]

## POLITICAS APLICADAS E INSTITUCIONALIDAD

Aunque el problema de contaminación tiene larga data, y su solución ha involucrado el gasto de grandes recursos a lo largo de las últimas décadas, pareciera haber coincidencia en señalar que sólo a fines de los años '80, la administración manifestó una real voluntad política para resolver el tema, realizando un esfuerzo

particularmente intenso y eficaz. Según algunos, este cambio de actitud se debería en gran medida a la mayor presión ejercida por la comunidad (L.M. Guerra, 1989).

Ya en los años '70, existían instituciones, leyes y normas orientadas al mejoramiento de la calidad ambiental del AMCM. El control de emisiones provenientes de industrias y establecimientos comerciales y de servicios, data de 1971. Ese año, el Comité Nacional para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental (CONACYT), bajo la coordinación del Subsecretario de Bienes e Inmuebles de la Secretaría del Patrimonio Nacional, formuló la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental. Esta ley sentó las primeras bases para la prevención y el control.

Ese mismo año se elaboró un reglamento para la prevención y control de la contaminación atmosférica originada por la emisión de humos y polvos, reglamento que fue aprobado por una comisión tripartita integrada por el gobierno, sectores empresariales y sindicales.

Posteriormente, en 1982, se promulgó la Ley Federal de Protección al Medio Ambiente. De esta ley se derivaron el Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera y las Normas Técnicas Ecológicas. Esta últimas especifican los niveles máximos de emisión provenientes de fuentes fijas.

El Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera cubre tanto la contaminación generada por fuentes fijas como por fuentes móviles. En el caso de las fuentes fijas, este reglamento establece que las Normas Técnicas Ecológicas podrán fijarse tanto para las fuentes existentes como para las nuevas y aquellas ubicadas en zonas críticas.

Asimismo, el reglamento determina que, para operar, las fuentes fijas deben tener una Licencia de Funcionamiento, la que será expedida por la Secretaría de Desarrollo Urbano (SEDUE).

A su vez, de acuerdo al Artículo 17, Capítulo II, los responsables de la operación de fuentes fijas que se encuentren dentro de la jurisdicción federal deberán: operar y mantener equipos y sistemas de control; inventariar sus emisiones; emitir sólo a través de ductos o chimeneas; instalar plataformas y puertos de muestreo; medir periódica o continuamente sus emisiones; y realizar monitoreos perimetrales.

Las Normas Técnicas Ecológicas se definieron para el bióxido y el trióxido de azufre y para las neblinas de ácido sulfúrico en plantas productoras de este ácido; plantas productoras de ácido dodecil-bencén-sulfónico. Asimismo, se dispusieron estándares para controlar las emisiones de partículas, CO, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> proveniente de procesos de combustión de petróleo diesel, de carbón, petróleo y gas natural.

[El reglamento y las normas tienen como punto de referencia el Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), definido sobre la base de estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud y estudios toxicológicos epidemiológicos y experimentales.]

A mediados de la década del 80, aumentó la inquietud respecto al problema de la contaminación y surgieron dudas sobre la efectividad de las políticas vigentes a es:



fecha. Por ejemplo, se estimó que las normas eran incompletas y poco claras ya que, por ejemplo, no especificaban frecuencias.

[La creciente presión de la ciudadanía y el mayor compromiso de las autoridades federales permitieron la formulación de nuevas políticas y programas (CEPAL, 1991,b). En 1988, se promulgó la Ley General de Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente, reemplazando la Ley Federal de Protección al Medio Ambiente de 1982 (H. Bravo y R. Torres, 1989).]

[Además se logró el desarrollo de una estrategia de gestión global para el AMCM: el Programa Integral contra la Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PICCA), que opera desde 1990.]

[Este programa comprende el control de fuentes fijas y móviles mediante 42 proyectos diferentes e incluye el monitoreo de la calidad del aire, la mantención de un inventario de emisiones, la determinación, el control y fiscalización de regulaciones y estándares. La meta es llegar a un nivel de 2,8 millones de toneladas, es decir, una reducción del 43% respecto a 1987 (CEPAL, 1991,b).]

[El énfasis está puesto en el control de la contaminación originada por las fuentes móviles. Sus principales elementos son:]

#### [Mejoramiento de combustibles]

Esta parte del programa busca lograr un cambio de la composición de los combustibles utilizados por los vehículos para contribuir a la reducción de la contaminación y permitir la introducción de la tecnología del convertidor catalítico.

[Por una parte, se han introducido gasolinas oxigenadas para compensar la deficiencia de oxígeno en la atmósfera (Lacy Tamayo). Con esto se reducen las emisiones de CO y HC, gracias a una combustión más completa (si bien aumenta la generación de NOx).]

[Por otra, se ha establecido un programa para el uso de gas licuado y gas natural comprimido en el transporte público. El uso de gas licuado permite eliminar el 100% de las emisiones evaporativas de plomo, el 85% de las emisiones de CO y el 50% de las emisiones de HC. No obstante, aumenta la contaminación por NOx. Si el gas licuado es usado en conjunto con convertidores catalíticos, se podría lograr una reducción de las emisiones provenientes de vehículos del orden del 90%, atacando también el problema del NOx y el ozono (R. Lacy Tamayo, 1992).]

[Asimismo, entre 1980 y 1992, se ha logrado una reducción del contenido de plomo en la gasolina de 0,9 g de plomo por litro a 0,14 g por litro, lo que involucra una reducción de 85% en los últimos doce años. Paralelamente, se ha introducido un nuevo tipo de gasolina sin plomo. Esta última parte del programa se inició en 1989, y en 1992 ya se había logrado cubrir un 26% del consumo de gasolina en el Valle de México. El abastecimiento de bencina sin plomo es un punto crítico para la introducción masiva de convertidores catalíticos.]

[Por último, con respecto al petróleo diesel, se ha estado utilizando un diesel especial con menos de 0,5% de azufre. Actualmente se realizan inversiones para disminuir aún más dicho contenido y lograr el control del porcentaje de aromáticos.]

#### [Modernización y Racionalización del Transporte Colectivo]

[En esta parte del programa, se ha buscado aumentar el uso del transporte colectivo y desincentivar el uso de vehículos particulares. Para ello se ha buscado mejorar la calidad y las condiciones de operación del transporte colectivo. Se ha dado prioridad a la ampliación del Metro, el que cubre actualmente 154 kilómetros de vías. Se han renovado los buses. Se están incorporando nuevas máquinas para el transporte de pasajeros a través de un sistema de concesiones de servicio alterno. También se encuentran en funcionamiento 19 líneas de trolebuses con 430 unidades de servicio. Se ha estimulado la renovación de taxis viejos (año 1986 o anteriores) por vehículos que utilizan convertidores catalíticos y gasolina sin plomo. También se han incorporado nuevos trenes (R. Lacy Tamayo, 1992).]

En el caso de los vehículos de transporte público de menor tamaño, se han racionalizado las rutas y se ha logrado la incorporación de convertidores catalíticos.

La renovación de las máquinas de transporte colectivo ha sido posible gracias al establecimiento de créditos especiales, a través de acuerdos con bancos y organismos financieros.

#### Control de emisiones vehiculares

La norma vigente para controlar los niveles de emisión de los gases de escape de vehículos nuevos fue establecida en 1988. La existencia de normas no es nueva, y ya en 1971 se habían hecho intentos infructuosos de controlar las emisiones de los vehículos (H. Bravo y R. Torre, 1989).

Las empresas automotrices tuvieron que esforzarse para lograr que las normas vigentes se cumplieran, debido a las particulares condiciones de funcionamiento que presenta la altura de la ciudad de México.

La norma vigente fijó el año 1992, como fecha límite para la instalación de convertidores catalíticos. Ese año, cerca del 80% de los vehículos producidos en México deberían haber incorporado el convertidor catalítico, el que usado en conjunto con gasolinas especiales permitiría la reducción en un 90% de las emisiones.

A contar de 1993, se espera que las normas de emisión de escape en México sean similares a las existentes en Estados Unidos, lo que se considera será un estímulo para la introducción de tecnologías que permitan controlar las emisiones en frío y evaporativas, así como la sustitución de combustibles en vehículos de uso intensivo (gasolinas reformuladas o combustibles alternos - R. Lacy Tamayo, 1992). [La meta para 1998, es el "automóvil emisión cero"]

Las emisiones son controladas dos veces al año, por un sistema de inspección (CEPAL, 1991,b). Las autoridades vigilan que los sistemas de control operen eficazmente.

[En forma adicional, existe un programa de restricción vehicular y hay limitaciones al estacionamiento en las zonas céntricas.]

El mejoramiento de infraestructura también se ha utilizado como forma de disminuir el nivel de contaminación generado por la circulación de vehículos.

### [Sustitución de Combustibles y Mejoramiento de Procesos en la Industria]

Este programa ha puesto énfasis en el tema de la combustión. Es así como, en el caso de la industria, las medidas anteriores se han complementado con la sustitución de petróleo por gas natural en las centrales termoeléctricas, el que ha llegado a un 40% del consumo de las centrales ubicadas en el AMCM. Además, existe un convenio entre SEDESOL y las 1.500 firmas más contaminantes para sustituir procesos y combustibles en plazos definidos.

También se ha intervenido en los procesos mismos, mediante la incorporación de equipo anticontaminante: quemadores eficientes, filtros y convertidores catalíticos. Se han firmado convenios con 1.550 industrias para que, en un plazo máximo de 3 años, adopten las medidas necesarias, debiendo entregar informes de avance cada tres meses (CEPAL, 1991.b). Estas medidas se han acompañado de la inspección permanente del funcionamiento de las empresas industriales.

Por otra parte, se ha buscado la racionalización del abastecimiento de materias primas y productos, con el objeto de disminuir el rol del transporte en los niveles de contaminación.

Por último, en los casos que ha sido necesario y posible, se ha procedido a la relocalización de las industrias.

### [Reforestación y Recuperación de Áreas Degradadas]

[La recuperación de áreas degradadas que generan polvo y partículas ha constituido parte de la estrategia de este Programa Integral. En este caso se ha considerado el mejoramiento de la infraestructura urbana, como la pavimentación, el drenaje, la recolección de basura y disposición de desechos.] También se ha procedido a reforestar. En 1991 se plantaron cerca de 12 millones de árboles y se espera alcanzar los 100 millones en 1994.

Este programa de carácter permanente se complementa con el Programa Invernal y el Plan de Contingencias Ambientales, similares a los de Sao Paulo.

El Programa Invernal opera entre el 21 de noviembre y el 28 de febrero, de cada año, para prevenir los efectos de la acumulación de contaminantes durante condiciones atmosféricas adversas que los entrapan. Este programa contempla la sustitución de combustóleo por gasóleo en la industria y las empresas; la reducción de emisiones de las plantas termoeléctricas gracias al uso de gas natural y la reducción de un 30% a un 40% del nivel de operación de las plantas; una inspección ambiental más estricta de las 1.500 empresas más contaminantes y las 300 más críticas; la vigilancia aérea para impedir quema a cielo abierto y operaciones de fundición clandestinas; y el control de operación de incineradores de hospitales.

Durante este período, se presta especial atención a la circulación vehicular, se prohíbe el estacionamiento en vías congestionadas, se retiran de circulación los vehículos más contaminantes, se amplía el horario de comercio y transporte para redistribuir movimientos, y se modifican horarios de carga y descarga y de distribución de combustibles.

En cuanto al Plan de Contingencias Ambientales, es un plan preventivo que se aplica en condiciones críticas. Estas se determinan en función del pronóstico ambiental para las siguientes 24 horas y de acuerdo a la superación de las normas por los niveles de concentración.

#### Nivel 1

250-350 puntos de IMECA. Reducción del 30% al 40% de la actividad industrial, especialmente la de mayor potencial contaminante. Se suspenden las actividades al aire libre en las escuelas primarias y secundarias. Se suspende la circulación del 50% de los vehículos de oficinas públicas. Se suspende, desde la madrugada y hasta las 12 horas, el servicio de tintorerías, planchadurías, baños públicos y actividades donde se apliquen solventes y pinturas. Se suspenden actividades en las plantas de asfalto.

#### Nivel 2

351-500 puntos de IMECA. Reducción del 50% al 75% de la actividad en cerca de 1.500 industrias. Se suspenden actividades en escuelas, oficinas públicas, cines, teatros, centros nocturnos, centros comerciales de bienes no comestibles y lugares de afluencia masiva. Se amplía la restricción vehicular.

#### Nivel 3

501 puntos de IMECA y más. Se suspenden todas las actividades potencialmente contaminantes.

La implementación del PICCA y de los otros programas requiere de un sistema de monitoreo y fiscalización permanentes. Existe un sistema de medición de la calidad del aire, que hasta 1992 fue operado por SEDESOL y actualmente es administrado por la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Valle de México. Este sistema cuenta con 32 estaciones en red automática, más 19 estaciones manuales y dos unidades móviles. Se monitorean los niveles de plomo, SO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, ozono y partículas (Comisión, 1992).

Este sistema es relativamente nuevo, su desarrollo e implementación data de mediados de los años '80, y la falta de información sobre la calidad del aire ha sido uno de los problemas con los que ha tropezado el desarrollo de políticas. Aun cuando se han realizado diversos estudios, éstos presentaron una serie de debilidades que limitaron la capacidad para efectuar un diagnóstico adecuado de la situación (H. Bravo y R. Torres, 1989).

Por su parte, la SEDUE ha elaborado un inventario de emisiones sobre la base



de 4.097 industrias consideradas las más contaminantes. [Este inventario incluye la identidad de la fuente de emisión, la descripción de los procesos industriales y de los materiales manejados, el inventario de emisiones que indica el tipo y la cantidad de contaminantes, y una descripción de los equipos y sistemas de control de emisiones.]

Parte importante de la información que conforma este inventario es proporcionada por las mismas empresas, de acuerdo al Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera. Los responsables de las fuentes fijas deben entregar información tanto sobre sus niveles de emisión como del estado y funcionamiento de la planta y los equipos de control.

La SEDUE sólo realiza inspecciones en el terreno en casos de omisión, revisión, denuncia pública, o cuando se detectan niveles altos de contaminación en el aire.

El incumplimiento de las normas y sus sanciones están contemplados en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Medio Ambiente. Las sanciones incluyen multas, cierres temporales y definitivos, así como penas de prisión que pueden ir de un mes a cinco años (J.M. Guerra, 1989). En general, se ha optado por el cierre, en vez de aplicar multas, ya que los juicios envueltos afectan la rapidez del sistema para disminuir efectivamente las emisiones. El levantamiento de la clausura se establece sobre la base de la firma de un convenio entre la autoridad y el establecimiento. En este convenio, el empresario se compromete a seguir un programa para llevar las emisiones a niveles aceptables. En él se especifican las acciones y los plazos respectivos. El cumplimiento progresivo del programa es verificado por la autoridad mediante visitas periódicas.

La aplicación de las normas ha sido acompañada de campañas de información a los empresarios respecto de sus obligaciones.

La institucionalidad ha sufrido diversos cambios a lo largo de las últimas décadas. Los primeros organismos en participar en la formulación de leyes y reglamentos fueron la Subsecretaría de Bienes e Inmuebles de la Secretaría del Patrimonio Nacional y el Comité Nacional para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del CONACYT.

Posteriormente, en 1972, se creó la Subsecretaría del Mejoramiento del Ambiente al interior de la Secretaría de Salubridad y Asistencia. En general, el desempeño de esta institución fue pobre, en gran parte por las limitaciones del marco institucional en que se encontraba. Además no contaba ni con el presupuesto ni con el personal necesario.

[En 1982, se creó la Subsecretaría de Ecología, dependiente de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), reemplazando a la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente. Sus atribuciones comprenden la regulación, tanto en cuestión de prevención y control de la contaminación, como del manejo integral de los recursos naturales, la educación y la gestión ambiental.]

[En 1986, se creó la Comisión Nacional de Ecología (CONADE), presidida por el Secretario de la SEDUE. Coordina las diferentes secretarías de estado que intervienen en la gestión ambiental.]

La Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente delega en los estados y municipios las facultades para prevenir y controlar la contaminación, así como la facultad de crear y administrar áreas naturales, llevar a cabo evaluaciones de impacto ambiental y establecer y aplicar las sanciones por infracciones.

Esta institucionalidad responde a la evolución experimentada por la capacidad de los gobiernos locales. Así, en un comienzo, hace veinte años, el control era efectuado por las autoridades federales. En la medida en que ha aumentado la preocupación por el tema y las capacidades de los gobiernos locales, éstos han ido adquiriendo un papel más importante en la fiscalización y control, mediante la modificación de las leyes y las mayores atribuciones que se les han otorgado.

De este modo, la implementación del PICCA, está a cargo del gobierno federal, así como de los gobiernos estatales y municipales. El PICCA cuenta con un Secretariado Técnico, constituido por representantes de las instituciones participantes.

El control de las fuentes fijas lo realiza la SEDUE, quien controla a la industria con procesos de combustión o de transformación que emiten al aire volúmenes significativos de contaminantes.

Las emisiones de fuentes pequeñas, como baños públicos, hoteles, hospitales, restaurantes, lavanderías, panaderías y otros, son controladas por el Departamento de Distrito Federal (DDF) y el gobierno del estado de México.

Existe además una Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental del Valle de México. Desde 1992, esta entidad tiene a su cargo la medición y evaluación de los índices de calidad ambiental, decide sobre la aplicación de planes de contingencia y coordina las acciones correspondientes con SEDESOL, el DDF, SEP, PEMEX, la Compañía Federal de Electricidad y los gobiernos estatales y municipales.

## RESULTADOS Y TENDENCIAS

[Se estima que el costo de la recuperación de la calidad del aire en el AMCM llegaría a los 2,563 mil millones de dólares (CEPAL, 1991)] En el caso de la primera fase del PICCA, el gasto de gobierno ascendería a 14 billones de pesos mexicanos. A eso hay que añadir el costo en que deberán incurrir los privados y el gasto involucrado en la sustitución de combustibles, que significará mayores costos de importación y transporte. En conjunto se estima que se está destinando un 1% del PIB a solucionar los problemas ambientales (Comisión, 1992).]

La Comisión estima que la masa total de emisiones de 4,9 millones de toneladas en 1988, se redujo a 4,3 en 1992, es decir, se ha logrado un 10% de disminución en la contaminación (Comisión, 1992). Otras fuentes indican que la reducción alcanzaría al 15% (Horizontes Urbanos, 1990).

[Al igual que en Estados Unidos, uno de los mayores éxitos ha sido el control de la contaminación por plomo, gracias a la reducción del contenido de plomo en los combustibles en más de un 85% entre los años 1980 y 1992.] [Asimismo, la reducción

En los niveles de  $\text{SO}_2$  ha sido importante, estimulada por la sustitución de gas natural en las plantas termoeléctricas, lo que implica alrededor de 3.700 toneladas de  $\text{SO}_2$  menos al año, y el uso de gasóleo, con un contenido de azufre inferior al 70% comparado con el combustóleo (H. Bravo y R. Torres, 1989). [Por su parte, el uso de gasolinas oxigenadas ha reducido las emisiones de CO en un 15% y de HC en un 11% (Horizontes Urbanos, 1990). En general se considera que las concentraciones de plomo,  $\text{SO}_2$  y CO se encuentran la mayor parte del año por debajo de las normas de calidad del aire (R. Lacy Tamayo, 1992).]

Parte importante de los resultados aún está por verse, como la reducción de las emisiones vehiculares en un 90%, una vez que se introduzca masivamente el convertidor catalítico de tres vías. La ampliación del metro disminuirá en más de 22 mil toneladas la emisión anual de contaminantes (Comisión, 1992). La incorporación de 3.500 autobuses con motores eficientes debería reducir las emisiones en otras 13 mil toneladas (Comisión, 1992).

[Pero independientemente de los éxitos que puedan lograrse mediante las políticas actuales, la complacencia está fuera de lugar. Los escenarios de crecimiento futuro son preocupantes. La población está creciendo a un 2% al año, y el número de vehículos crece a tasas igualmente aceleradas (F. Guzmán, 1992; H. Bravo y R. Torres, 1989; L.M. Guerra, 1989).]

De la experiencia de las autoridades mexicanas es posible constatar la importancia de ciertos factores en la consecución de las metas de control. Entre ellos se cuenta la voluntad política, la disponibilidad de información adecuada, las capacidades humanas y técnicas y, no menos importante, la capacidad de gestión en aquellas instituciones públicas que deben implementar los programas.

Finalmente, la experiencia mexicana también ha dejado en claro los posibles efectos secundarios del control de la contaminación. Por ejemplo, la mejor combustión obtenida gracias al uso de gasolinas oxigenadas aumenta las emisiones de  $\text{NO}_x$ . El uso de gas licuado también genera mayores emisiones de  $\text{NO}_x$  y por eso es importante el uso de convertidores. A su vez, la reducción del plomo habría influido negativamente sobre los niveles de ozono (H. Bravo y R. Torres, 1989). Este tipo de problemas refuerza la necesidad de abordar el control de la contaminación en forma sistémica e integrada.



## ALEMANIA Y EL CASO DE NORTH RHINE-WESTFALIA

JUANITA GANA Q.

### CARACTERIZACION DE LA SITUACION

[Situado en el oeste del país y limitando con Bélgica y Noruega, el estado de North Rhine-Westfalia posee una superficie de 3.200  $\text{km}^2$  y una población de más de 6 millones de habitantes. Allí encontramos ciudades como Bonn, Colonia, Düsseldorf, Duisburg, Essen, Gelsenkirchen y Dortmund.]

[En este estado se ubica la región del Ruhr, una de las zonas de mayor concentración de industria, tráfico y población en Europa. Concretamente, hablamos de un tercio de la industria alemana y de casi el 50% de las plantas de energía de la zona oeste. Incluye cerca de 3.500 fuentes industriales con un significativo potencial de contaminación. De éstas, el 30% son químicas y el 20% pertenece a la industria del hierro y del acero (Rolf Seidler, 1992). Otro 20% lo constituyen las 168 plantas térmicas, con una capacidad de 100.000 MW (no incluye plantas con capacidad sobre 50MW, Rolf Seidler, 1992). Debido a la localización de las minas de carbón (por largo tiempo insumo principal en la generación de energía), estas plantas se han ubicado principalmente en los límites de las zonas urbanas, contribuyendo considerablemente a la contaminación atmosférica de las ciudades.]

[Por otra parte, con 2,4 millones de vehículos, esta zona posee la red de transporte de mayor densidad de Europa, con 20 mil km de vías y dos aeropuertos internacionales, constituyendo el corredor central entre el oeste y el este de Europa.]

Hoy en día, luego de varios años de aplicación de programas de control de la contaminación, con énfasis en el sector industrial y de energía, el tránsito vehicular es el principal causante de la contaminación atmosférica.

En 1977, la industria y los hornos generaban alrededor de 400 mil toneladas al año de gases inorgánicos y el tránsito generaba cerca de 130 mil. En 1987, las emisiones de la industria y de los hornos habían sido reducidas a alrededor de 150 mil toneladas, en tanto el tránsito seguía generando cerca de 130 mil toneladas. En el caso de las emisiones de gases orgánicos, la evolución es aún más notable. En 1977, la industria generaba cerca de 80 mil toneladas y el tránsito 5 mil. En 1987, la industria había logrado reducir sus emisiones a algo más de 10 mil y los vehículos habían duplicado su contribución.

Actualmente la contribución de la industria se concentra en las plantas más antiguas.



✓ **Tabla N° 10.8:** Contribución porcentual de los vehículos a la contaminación en Alemania (\*), 1989.

	Vehículos	Industria, Hornos y Otros
SO <sub>2</sub>	8	92
Hollín	30	70
CO	74	26
NOx	68	32
HC	50	50
Benceno	90	10
CO <sub>2</sub>	20	80

Fuente: Seidler, R., 1992.

(\*) Corresponde a la ex República Federal Alemana.

En la siguiente Tabla encontramos la distribución de las emisiones de NOx provenientes de vehículos, según su tipo, donde notamos la contribución significativa de los vehículos particulares.

✓ **Tabla N° 10.9:** Contribución a las emisiones de NOx por tipo de vehículo, 1989.

Vehículos Particulares	53%
Vehículos Comerciales	30%
Vehículos Com. Diesel	4%
Otro Tipo de Transporte	13%

Fuente: Seidler, R., 1992.

En cuanto a los otros tipos de contaminantes (los vehículos particulares son también los principales responsables de la contaminación en el caso del benceno y del HC: alrededor del 80%. Sólo en el caso de las partículas, los vehículos diesel aparecen con una contribución también cercana al 80%) Estas últimas cifras corresponden a la ex República Federal Alemana para el año 1980 (Rolf Seidler, 1992).

## POLITICAS APLICADAS E INSTITUCIONALIDAD

En los años setenta se inició el desarrollo sistemático de leyes y normas tendientes a controlar la contaminación, si bien existía a la fecha un conjunto de normas dispersas que, de una u otra forma, intentaban dar cuenta del problema.

[Las bases legislativas para la protección del medio ambiente en Alemania se encuentran en el Programa Inmediato de Acción Ambiental del Gobierno Federal de 1970, y en el Programa Ambiental de 1971 (CEPAL, 1991,c). En los años siguientes se promulgó una serie de nuevas leyes y normas, estimándose que hoy en día, la primera fase legislativa está finalizada.]

En el caso del aire, es la Ley Federal de Inmisiones, promulgada en 1974, con sus modificaciones posteriores y disposiciones reglamentarias y administrativas, la que define el marco para la prevención y control de la contaminación. Esta ley busca controlar los efectos nocivos de las emisiones sobre la salud de las personas y el ambiente, y exige su reducción mediante el uso de la mejor tecnología disponible.

Los principales instrumentos de la ley son (Rolf Seidler, 1992):

- [Los planes de gestión de la calidad del aire que incluyen los inventarios de inmisión y emisión, así como las alternativas de control en el caso de áreas que sobrepasan los estándares de inmisión]
- [Los procedimientos de otorgamiento de permisos a las plantas ubicadas tanto en áreas de cumplimiento como de no cumplimiento de los estándares de inmisión. Procedimientos que a veces incluyen la participación de la comunidad.]
- [Prescripciones específicas para plantas pequeñas que no requieran de permisos especiales para funcionar]
- [Regulaciones del contenido de plomo y sulfuro en los combustibles, así como especificaciones para productos como lubricantes]
- [Sistemas de alerta en caso de que el smog llegue a niveles críticos]

Las Instrucciones Técnicas para el Control de la Calidad del Aire de 1974, y sus posteriores modificaciones especifican: los estándares para la calidad del aire, sobre la base de un promedio anual, diario y horario; los estándares de emisión; los principios por los cuales se guía el otorgamiento de permisos; los requisitos que debe satisfacer una planta antigua; las condiciones de monitoreo; y las regulaciones específicas para cierto tipo de plantas (Rolf Seidler, 1992).

✓ **Tabla N° 10.10:** Valores límite de concentración para ciertos contaminantes.

Contaminante	Promedio Anual	Corto Plazo
CO	10,00 mg/m <sup>3</sup>	30,0 mg/m <sup>3</sup>
SO <sub>2</sub>	0,14 ppm	0,4 ppm
NOx	0,08 ppm	0,3 ppm

Fuente: CEPAL (1991,c).

La ley especifica el tipo de plantas e instalaciones que, debido a sus altos niveles de emisión, necesariamente deben contar con permisos. En este grupo se encuentran las plantas de combustión, las industrias de cemento, las instalaciones para el tratamiento de minerales de hierro, las plantas químicas y las refinerías de petróleo. Asimismo, especifica los valores límite para dichas emisiones y los procedimientos de medición (Rolf Seidler, 1992).

**Tabla N° 10.11:** Valores máximos de emisión para algunos tipos de contaminantes (kg/semana).

Contaminante	Emisión Límite
NOx	250
SO <sub>2</sub>	500
CO	5.000
Partículas	250
PTM Tóxicas	10

Fuente: CEPAL (1991,c).

[El otorgamiento de permisos es un aspecto clave de la ley y de la política de control de la contaminación, por cuanto establece requisitos de diverso tipo para las empresas que puedan tener un impacto importante sobre los niveles de contaminación del ambiente.] Estos van desde las normas de emisión al uso de la mejor tecnología disponible.

[Entre otras, las obligaciones del operador son impedir que se produzcan efectos dañinos, prevenirlos a través de tecnologías modernas y posibilitar la reutilización o debida eliminación de los residuos.] La obligación de usar la mejor tecnología disponible y cumplir con los niveles máximos de emisión es independiente del impacto que pueda tener sobre los niveles de concentración del ambiente. En particular, puede ubicarse en un área no crítica e igual estar sujeta a las normas de emisión. En la medida en que la autoridad tenga seguridad de que la planta puede cumplir con estas obligaciones, otorga el permiso.

En el caso de las plantas existentes, se ha dado particular énfasis a los planes de control para las plantas térmicas de gran tamaño, de cemento e incineradores, donde se controlan las emisiones de SO<sub>2</sub>, NOx y partículas.

Para las plantas nuevas, la evaluación de su impacto potencial sobre la calidad del ambiente es hecha tanto en términos de los niveles de emisión de la planta en cuestión, como del impacto que éstos tendrán sobre los niveles totales de emisión en el área y sobre la concentración del ambiente. Se exige que las nuevas plantas sean

construidas de acuerdo a las mejores tecnologías disponibles. También es necesario que las plantas cuenten con adecuados sistemas de monitoreo (Rolf Seidler, 1992).

Una vez en funcionamiento, las plantas son inspeccionadas por expertos comisionados por las agencias estatales. De allí en adelante, están sujetas a revisión cada tres años. Estas visitas de inspección incluyen no sólo los registros de los niveles de emisión sino las condiciones generales de operación de la planta. En el caso de las plantas de energía, de cemento o incineradores, el monitoreo y registro de los niveles de emisión es continuo y regularmente fiscalizado por inspectores (Rolf Seidler, 1992).

[Existe una relación entre los estándares aplicados a las plantas existentes y las nuevas. En el caso de las plantas existentes hasta 1989, no debían sobrepasar más de 3 veces los estándares vigentes para plantas nuevas. Y entre 1991 y 1994, éstas no debían exceder más de 1,5 veces dichos estándares. (Rolf Seidler, 1992).]

Recientes cambios en las regulaciones han entregado mayores facultades y responsabilidades al encargado del control de la contaminación de la empresa, y el operador es responsable de entregar a la autoridad toda la información pertinente.

En el marco de esta ley, las autoridades correspondientes deben preparar un inventario de inmisión y emisión en las áreas críticas, con un registro de los niveles de concentración y del volumen de contaminantes emitidos, por tipo de contaminantes, por áreas y de acuerdo a su distribución en el tiempo (Rolf Seidler, 1992). Este registro incluye las condiciones de contaminación derivadas de las características del tránsito. El desarrollo de este inventario es fundamental y, de hecho, el principal problema que ha enfrentado la estrategia de control de la contaminación ha sido el de las variaciones espaciales y temporales de los niveles de contaminación.

El inventario de inmisiones registra SO<sub>2</sub>, partículas, NOx, CO, compuestos de metales pesados y compuestos de cloro y flúor. Inicialmente, las mediciones se efectuaban en 3.200 lugares diferentes, 13 veces al año. Actualmente, gracias a los avances logrados en el control de la contaminación, sólo las partículas y los compuestos de plomo y cadmio son registrados a ese nivel de detalle (Rolf Seidler, 1992).

Mientras estas áreas críticas se encuentren por sobre los estándares de concentración, la autoridad estatal debe desarrollar un plan de control de las emisiones para ellas. Este es un instrumento fundamental de la estrategia de control de la contaminación. En la práctica, se han definido cinco áreas críticas y se ha diseñado un plan diferente para cada una de ellas. Estos planes tienen una duración de cinco años y, a la fecha, han sido renovados por dos veces consecutivas (Rolf Seidler, 1992).

[El inventario permite, además, la identificación de las fuentes de contaminación que requieren permisos especiales, de sus niveles de emisión, así como, eventualmente, del control de las medidas que éstas adopten para llevar sus emisiones a niveles admisibles.]

[En caso de incumplimiento, las sanciones pueden incluir multas, la paralización de actividades y la relocalización.]



Existe además un conjunto de leyes relacionadas que han contribuido a mejorar los índices de calidad del aire, como la Ley de Plomo en la Bencina, promulgada en 1971, o la Ley de Sustancias Químicas y la Ley de Ahorro de Energía.

A comienzos de la década de 1980, si bien se habían logrado avances notables en el control de la contaminación proveniente de la industria, los índices globales no habían mejorado sustancialmente, en especial en aquellos casos en los que el origen principal de la contaminación se encontraba en el flujo vehicular, como el CO, el NOx, los HC, las partículas y el benceno. Se produjo entonces un nuevo impulso al desarrollo de políticas de control. Por una parte, se procedió a enfatizar el uso de estándares tecnológicos y a aumentar su grado de estrictez. Hoy en día se considera que Alemania tiene uno de los programas de descontaminación atmosférica más enérgicos del mundo, particularmente debido a dichos estándares, por cuanto sus normas de calidad ambiental son menos estrictas que las de otros países. Por otra parte, se definió una estrategia para abordar el problema de la contaminación vehicular.

Hasta 1980, no existían programas integrales de control para las emisiones de vehículos. Pero la creciente importancia que comenzó a adquirir el transporte en la contaminación del aire, en 1990, forzó la inclusión de regulaciones específicas para este sector en la Ley Federal de Inmisiones, las que facilitan la intervención administrativa:

“Las autoridades pueden restringir o incluso prohibir el tránsito en vías específicas o en ciertas áreas de acuerdo con las regulaciones del tránsito, teniendo en consideración las necesidades del flujo vehicular y las orientaciones de planificación urbana, cuando la autoridad responsable por el control de inmisiones estime que es necesario, en consideración a las condiciones locales, para reducir los efectos nocivos de los niveles de contaminación del aire o prevenir su ocurrencia.” (Rolf Seidler, 1992).

Esta regulación especifica las sustancias contaminantes a controlar (NOx, benceno y partículas de diesel), los niveles de concentración de referencia y los procedimientos de medición, durante el período de un año y a 1,5 metros de la vía.

Las alternativas de política para lograr el cumplimiento de los estándares implican, por una parte, reducir el volumen de emisiones provenientes del flujo vehicular y, por otra, simplemente reducir este último.

En la primera línea se están realizando esfuerzos por desarrollar sistemas inteligentes para mejorar las condiciones del tránsito. Igual propósito cumplen los programas de mejoramiento de la calidad del combustible y el desarrollo de combustibles alternativos, junto a tecnologías que permitan su empleo. Asimismo, el desarrollo de tecnologías más eficientes en el uso del combustible y que generan menos contaminación constituye una vía de generación de soluciones.

Actualmente, prácticamente el 90% de los vehículos comerciales cumplen con los límites vigentes de emisión de partículas, que no se cambiarán hasta 1996. En ese año se espera un ajuste de los estándares y la adopción de límites más estrictos.

En la segunda línea se encuentra la adopción de medidas que desincentiven el uso de vehículos particulares o que, simplemente, lo prohíban bajo ciertas circunstancias. Este tipo de medidas va desde la aplicación de impuestos especiales al consumo de combustible, las prohibiciones de circulación de los vehículos sin convertidores catalíticos o sin filtros para partículas, al cierre de vías en el caso más extremo.

Por último, las medidas de planificación urbana pueden jugar un rol central en ambos tipos de estrategias.

Se estima que la reducción del uso de vehículos particulares y el incremento en el uso del transporte público, serían particularmente eficientes, así como el mejoramiento de los combustibles.

[Estas medidas aún no se han implementado en todo su rigor y se teme que el impacto sea considerable y costoso, ya que áreas importantes de las ciudades podrían ser cerradas, en la medida en que se efectúen mediciones más estrictas. Por ejemplo, en el caso de Berlín, se estima que los valores máximos de inmisión de 10 µg/m³ para benceno y de 8 g/m³ para partículas, está excedido con creces en 17 rutas. Ante esto, el Senado estudia el desarrollo de un plan de control del tránsito] (Rolf Seidler, 1992).

Por el momento, se ha optado por el aumento significativo del impuesto sobre el combustible, lo que tiene por efecto reducir el uso de los vehículos particulares y generar ingresos para enfrentar inversiones a futuro. Paralelamente, en 1993, todos los vehículos estarán obligados a satisfacer las normas de emisión de escapes, lo que ha requerido el uso obligatorio de catalizadores de tres vías (Rolf Seidler, 1992). La introducción de convertidores catalíticos fue, en parte, producto de la presión de la Comunidad Económica Europea (CEPAL, 1991,a).

Otra medida implementada es la purificación de combustibles [Se ha reducido el contenido de sulfuros en el petróleo de un 0,3% a un 0,15%]. Esta medida, además de contribuir a reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>, es un paso indispensable para la incorporación de la tecnología del convertidor catalítico.

Asimismo, se ha establecido [la reducción del contenido de benceno en el combustible del 2,5% a menos del 1%, lo que permitiría rebajar el nivel de emisiones en un 33%. Si a esto se suma el uso de convertidores catalíticos en el 80% de los vehículos en circulación en Alemania, la rebaja podría llegar a un 60%, hacia 1998 (Roland Hassel, 1992).]

En Alemania, las atribuciones legislativas son compartidas entre el gobierno federal y los gobiernos estatales. Estos últimos juegan además un rol central en la etapa de implementación. En el caso de la contaminación atmosférica, la Constitución alemana ha otorgado facultades legislativas concurrentes al gobierno federal.

[A estos actores se ha sumado el poder legislativo ambiental de la Comunidad Europea, el que ha ido cobrando cada vez mayor importancia. Precisamente, un aspecto de diferenciación en el caso de las políticas adoptadas por Alemania, es la importancia que adquiere el aspecto regional. En efecto, el diseño de políticas ambientales en Alemania se encuentra cada vez más condicionado por la evolución de los acontecimientos en la Comunidad Económica Europea. La fuerte interrelación

entre las economías europeas y el impacto ambiental de sus actividades productivas ha significado que, en la práctica, la eficacia de las políticas de cada país de la región quede condicionada a las políticas aplicadas por los países vecinos. Este elemento regional es particularmente fuerte cuando se trata de problemas de contaminación de carácter global, como las emisiones de  $\text{SO}_2$  y la producción de lluvia ácida. Por otra parte, la interdependencia de los flujos económicos y el impacto de la legislación ambiental sobre la competitividad relativa de los países de la región, también han llevado a la necesidad de armonizar las políticas aplicadas en los países de la zona.]

De acuerdo al Acta Europea Unica de 1986, el derecho ambiental comunitario europeo tiene precedencia sobre el derecho ambiental alemán, con lo cual se resolvieron inconsistencias y ambigüedades en términos de las respectivas competencias legales (CEPAL, 1991,c).

[ Los principales organismos en Alemania son el Ministerio del Medio Ambiente, Protección a la Naturaleza y Seguridad de los Reactores Atómicos, creado en 1986; el Servicio Federal del Medio Ambiente, creado en 1974; y el Consejo de Expertos en Medio Ambiente, creado en 1971 (CEPAL, 1991,c). Los dos últimos tienen por objeto recopilar información y mantener una base de datos que permita sustentar la formulación de políticas ambientales.]

[ Hace algunos años, se creó un par de grupos asesores del gobierno federal: la Comisión Técnica para Seguridad en las Empresas, que elabora las normas técnicas de seguridad, y la Comisión de Accidentes, encargada de informar acerca de la situación de los bienes ambientales protegidos por la ley (CEPAL, 1991,c).]

En cuanto al grado de participación de la población, ésta es invitada a pronunciarse sobre el otorgamiento de permisos de instalación y funcionamiento. En tanto que, en la fijación de normas de inmisión y emisión, participan expertos, empresarios, afectados y autoridades administrativas.

## RESULTADOS Y TENDENCIAS

El costo estimado de las políticas implementadas es de 14 mil millones de dólares (CEPAL, 1991,a).

No es posible realizar una evaluación global de los resultados obtenidos por las políticas adoptadas a la fecha. Algunas de ellas están recién en fase de implementación, particularmente aquellas relativas al control de las emisiones vehiculares.

En este último caso, el efecto de medidas como la introducción de tecnologías no contaminantes, tardará tiempo en materializarse, ya que aún queda un gran número de vehículos antiguos. Se estima que en 1998, todavía habrá un 20% de vehículos sin catalizadores (Rolf Seidler, 1991).

Sin embargo, es posible hacer evaluaciones parciales de la situación. En general, se observan logros importantes en ciertas áreas. Los resultados han sido particularmente exitosos en lo que se refiere al control de las emisiones de la industria y de las fuentes generadoras de energía. [Las emisiones de gases inorgánicos fueron

reducidas en más de un 60% entre 1977 y 1987. Las emisiones de gases orgánicos fueron reducidas en más del 80% entre los mismos años (Rolf Seidler, 1992).]

[ En cambio, en el caso de las emisiones del transporte, si bien se ha logrado la mantención de los niveles de contaminación en los gases inorgánicos, en los gases orgánicos se observa una duplicación entre 1977 y 1987 (Rolf Seidler, 1992). Se espera que esta situación mejore, fruto de los nuevos planes y programas.]

En el cuadro siguiente podemos observar las tendencias de algunos contaminantes durante los años de la década de 1970 y parte de los '80. [Los mayores logros son la reducción en los niveles de emisión de  $\text{CO}$ , partículas y  $\text{SO}_2$ , en tanto que las emisiones de  $\text{NO}_x$  no muestran una tendencia clara. La reducción en las emisiones de partículas –lograda fundamentalmente gracias al control de las emisiones de las plantas térmicas y a la sustitución de carbón por petróleo y gas– podría haber sido aún mayor, si no fuese por el aumento del flujo de vehículos diesel (Roland Hassel, 1992).]

Tabla N° 10.12: Evolución de las emisiones de contaminantes en Alemania.

	(miles de toneladas métricas)			%
	1973-1975	1979-1981	1982-1984	
$\text{SO}_2$	3.600	3.300	2.750	-23,6
Partículas	950	750	650	-31,6
$\text{NO}_x$	2.600	3.100	3.000	+15,4
$\text{CO}$	11.700	9.000	7.400	-36,8

Fuente: Global Environment Monitoring System, citado en CEPAL (1991,a).

En el caso del  $\text{SO}_2$ , cifras posteriores indican nuevas reducciones en las emisiones anuales: 64% entre 1983 y 1988 (CEPAL, 1991,a). El éxito en el control de las emisiones de  $\text{SO}_2$  se debe fundamentalmente a la eficacia del control de las plantas térmicas. Ha resultado más lenta la reducción de los niveles de emisión de  $\text{NO}_x$ , debido al menor control sobre las emisiones vehiculares.

Los resultados son más impresionantes en áreas específicas de Alemania como Colonia, en donde el volumen total de contaminación disminuyó en un 70%. Sin embargo, la contaminación originada por el flujo vehicular aumentó en el 1,5%, confirmando la creciente importancia que tendrá a futuro el control de las emisiones vehiculares (Rolf Seidler, 1992). [Se espera que estas últimas disminuyan ligeramente hacia fines de esta década, en respuesta a las nuevas medidas adoptadas. No obstante, se teme que las ganancias derivadas del uso de tecnologías menos contaminantes tenderán a ser compensadas por el mayor crecimiento del parque vehicular.]



## SUECIA: EL CASO DE ESTOCOLMO

[Los problemas de Suecia son relativamente diferentes a los enfrentados en los países ya descritos, en parte, porque la pronta implementación de medidas efectivas para controlar la contaminación del aire ha permitido avances importantes en el tema. En parte también, debido a las características geográficas, demográficas y económicas de Suecia.]

[En este caso, si bien la contaminación por sustancias como el  $\text{SO}_2$ , el plomo o el ozono son motivo de preocupación, la acidificación de suelos y aguas, el efecto invernadero o el deterioro de la capa de ozono, son los temas que ocupan, en forma creciente, la atención de las autoridades suecas. Con esto, Suecia muestra lo que probablemente será la tendencia futura en cuanto a los nuevos desafíos que deberán enfrentar las políticas de control de la contaminación atmosférica.]

### CARACTERIZACION DE LA SITUACION

[En términos del tamaño de la población, Estocolmo es una ciudad más bien pequeña. Con una superficie de  $216 \text{ km}^2$ , viven en ella cerca de 700 mil personas, cuestión que hace una diferencia importante respecto a las otras áreas descritas.] Por una parte, el grado de concentración de la población en la capital es bastante bajo. Menos del 10% de la población sueca vive en el área. Por otra, el número absoluto de habitantes es considerablemente menor.

[En cuanto al tipo de actividad económica desarrollada, sobresalen los sectores de servicios, tanto públicos como privados. La industria emplea apenas un 17% de la población, y está orientada a sectores de tecnología blanda de avanzada.] En general, la industria en Suecia se encuentra dispersa, de modo que no hay zonas de concentración de actividad industrial que den origen a altos niveles de contaminación.]

[Sin embargo, estos hechos que podrían ser alentadores en cuanto al impacto de las actividades económicas sobre el medio ambiente, se combinan con un índice de vehículos por persona que está entre los más altos del mundo (alrededor de un vehículo cada tres habitantes). Actualmente hay cerca de 700 mil vehículos circulando en el área metropolitana de Estocolmo, de los cuales 300 mil corresponden a vehículos particulares. La tendencia ascendente en el número de vehículos se ha visto interrumpida ocasionalmente por eventos como recesiones económicas, el aumento de los precios del petróleo, los impuestos sobre el petróleo, y algunas campañas para incentivar el uso del transporte público. Prácticamente, el 50% de los viajes realizados involucran vehículos particulares, proporción que casi no ha variado en las últimas dos décadas.]

Los problemas de contaminación del área metropolitana de Estocolmo son similares a los de otras ciudades ya discutidas, en cuanto al tipo de sustancias:  $\text{CO}$ ,

$\text{NO}_x$ , plomo,  $\text{SO}_2$ , compuestos orgánicos volátiles y ozono. Pero el grado de severidad que alcanzan dichos problemas es considerablemente menor.

[La principal causa de los actuales niveles de emisión de  $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$  y plomo es el tránsito (más del 85%). Este también es responsable de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , aunque en menor proporción, cercana al 50%. La producción de energía es la responsable de más del 90% de las emisiones de  $\text{SO}_2$ , y casi del 40% de las emisiones de  $\text{NO}_x$ .]

Las emisiones de  $\text{SO}_2$  hoy día constituyen un problema secundario, en términos de la salud de las personas. Sin embargo, la generación de lluvia ácida, relacionada con este tipo de emisiones, se ha transformado en una preocupación para las autoridades suecas. Cerca del 70% de las emisiones de  $\text{SO}_2$  tienen su origen en los procesos de combustión de carbón y petróleo. Los vehículos diesel contribuirían con un 4%. El resto proviene de la industria (Katarina Victorin, 1992).

Pero parte significativa del depósito de azufre sobre aguas y suelos suecos proviene de las emisiones de países vecinos. De acuerdo a cifras correspondientes a los años '70, de las 480 mil toneladas de azufre que caían sobre Suecia, 380 mil se originaban fuera de sus fronteras (Instituto Sueco, 1985).

### POLITICAS APLICADAS E INSTITUCIONALIDAD

[El marco legal de las políticas implementadas en Suecia está constituido por la Ley de Protección del Medio Ambiente de 1969] la que, entre otras cosas, introdujo la obligación de obtener permisos para establecer cierto tipo de industrias contaminantes. Esta ley ha sido revisada en diversas oportunidades.

[Para controlar la contaminación atmosférica, la Agencia Sueca para la Protección del Medio Ambiente, estableció un conjunto de estándares de concentración para las diferentes sustancias contaminantes. La meta, definida por el parlamento sueco, es alcanzar estos estándares hacia el año 2000.]

Tabla N° 10.13: Normas para la concentración de contaminantes en el aire.

	1 hora	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 24 horas	Anual
$\text{SO}_2$	200	100	50
Humo		90	40
Partículas		110	50
$\text{PM}_{10}$		100	20
$\text{NO}_x$	110	75	50
$\text{CO}$		6*	

Fuente: Katarina Victorin, Taller Internacional, 1992.

(\*) Promedio de 8 horas.

También hay estándares y controles aplicados a los compuestos orgánicos volátiles y a los hidrocarburos.

En términos de emisiones, las metas implican la reducción del  $\text{SO}_2$  en un 80% entre 1980 y el año 2000, en tanto las emisiones de  $\text{NO}_x$  deberían bajar en 30% entre 1980 y 1995. Los compuestos orgánicos volátiles, incluyendo los HC, deberían reducirse en un 90% en las áreas urbanas. Se estima que esta última meta tomaría más tiempo, y se aspira a cumplir con una reducción de al menos el 50% para el año 2005.

En el caso del control de las fuentes fijas, en general, no existen límites de emisión por tipo de industria y los controles son hechos más bien a nivel individual. Las medidas adoptadas en cada caso, han tenido en consideración tanto la disponibilidad de tecnologías apropiadas como los costos involucrados. El principio es utilizar la mejor tecnología de control disponible.

Sin embargo, en el caso de las plantas de generación de energía se han establecido estándares para controlar el contenido de sustancias contaminantes como el azufre y el  $\text{NO}_x$ .

Tabla N° 10.14: Límites para las emisiones de plantas de energía.

	(ug/MJ)	
	Azufre	$\text{NO}_x$
Plantas nuevas		
actual	50	50 - 200
después 1993	30	30
Plantas viejas		
carbón	50 - 170	
petróleo	190*	

Fuente: Katarina Victorin, Taller Internacional, 1992.

(\*) Debería ser reducida a 50-100 mg/MJ.

Estas medidas, tendientes fundamentalmente a controlar las emisiones de  $\text{SO}_2$ , han sido complementadas con las orientaciones de la política energética sueca, normas sobre el contenido de azufre en los combustibles, la sustitución de combustibles, la reducción de su uso y el incentivo al desarrollo de sistemas centrales de calefacción.

En efecto, hoy en día casi el 50% de la energía es producida por plantas hidroeléctricas y un porcentaje igualmente importante por plantas nucleares. Además, el contenido máximo de azufre en el petróleo pesado es del 0,8%, y en el petróleo liviano es de un 0,2%. Se estima que el contenido efectivo en el primer caso se sitúa

en el 0,5-0,6% para buena parte del combustible utilizado. En el caso del segundo contendría menos del 0,1% (Swedish Environmental Agency, 1991). Igualmente importante ha sido el cambio de los sistemas individuales de calefacción a sistemas centrales.

Las medidas anteriores han sido acompañadas con el uso de impuestos especiales destinados a desincentivar el uso de ciertos combustibles e internalizar los costos ambientales derivados de las emisiones de  $\text{SO}_2$ , CO y  $\text{NO}_x$ . Tal es el caso del impuesto sobre el contenido de azufre del carbón y el petróleo, y el impuesto a las emisiones de  $\text{NO}_x$  de las plantas de energía eléctrica, puesto en práctica desde enero de 1992.

Este tipo de incentivos económicos, introducidos mayoritariamente en los años '90, han sido utilizados como un complemento, más que como un sustituto de las medidas tradicionales de regulación directa (Gunnar Nyquist, 1992).

[Para hacer frente a la contaminación generada por el tránsito vehicular, las autoridades suecas han hecho esfuerzos por mejorar las condiciones del transporte público y desincentivar el uso de vehículos particulares en la ciudad. Al mismo tiempo, se han hecho esfuerzos por sustituir combustibles y utilizar petróleo diesel con menos contenido de sustancias contaminantes.]

[En 1989, se introdujo el uso de gasolina sin plomo para vehículos con y sin convertidor catalítico. Actualmente, del 50% al 60% del combustible que se vende contiene plomo. El resto del combustible está sometido a normas de contenido de plomo, el que se ha ido reduciendo hasta llegar a 0,15 g/l.]

[A lo anterior, se añaden medidas como el uso de convertidores catalíticos implementada en 1989. Actualmente, cerca del 30% de los vehículos que circulan en Estocolmo tienen convertidor catalítico incorporado.]

Tabla N° 10.15: Límites a las emisiones de los escapes de vehículos nuevos, vigentes desde 1989.

	(g/km)			
	CO	HC	$\text{NO}_x$	Partículas
Vigentes	2,1	0,25	0,62	0,124
Desde 1993			0,25	0,05

Fuente: Katarina Victorin, Taller Internacional, 1992.

[Estos límites se encuentran dentro de los más estrictos a nivel de la comunidad europea. Los que se introducirán en 1993, corresponden a los estándares californianos que se espera estén vigentes para todo Estados Unidos en 1994.]



[Finalmente, también se han utilizado incentivos de carácter económico, como los impuestos especiales a la compra de vehículos nuevos y el impuesto al petróleo y otros combustibles.] A partir de 1986, este impuesto diferenció entre gasolina con y sin plomo.

[Especial atención se ha puesto al problema de acidificación de los suelos y del agua. Esto no es de extrañar, si se considera que los recursos forestales son uno de los principales activos de Suecia. Cerca del 70% de Suecia está cubierta por bosques y la acidificación amenaza la productividad de un sector clave de la economía.]

[Pero el control de este problema es mucho más complejo, por cuanto parte importante de las fuentes de deposición de azufre y nitrógeno se encuentran en países vecinos. Se estima que buena parte de las emisiones de  $\text{SO}_2$  (90%) y  $\text{NO}_x$  (80%) provienen de esos países.]

El no cumplimiento de las normas y regulaciones puede dar origen a multas o cárcel. En este sentido es interesante notar que una de las modificaciones recientes de la normativa establece que el monto de las multas debe guardar correspondencia con el ahorro potencial que obtuvo la empresa al no cumplir con la legislación. Se establece así un incentivo de tipo económico para cumplir con ella.

En cuanto al control de las fuentes y sus licencias, en el caso de las plantas más contaminantes, que suman alrededor de 450, es hecho por el Comité Nacional de Licencias para la Protección del Medio Ambiente, (Katarina Victorin, 1992).

[La Administración del Medio Ambiente y de la Salud Pública de Estocolmo ha llevado a cabo el control de los niveles de contaminación del aire por más de 25 años. En un comienzo, su preocupación fundamental eran las emisiones de las industrias y de las plantas térmicas. Hoy día son las emisiones del flujo vehicular. Se controlan los niveles de concentración y de emisión de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , CO, plomo, partículas, HC y ozono. Mediante sistemas computarizados, se monitorean los niveles de emisión de alrededor de 1.600 fuentes. Esta información proviene tanto de las inspecciones como de los informes entregados por las propias fuentes.]

El trabajo de la Agencia Sueca de Protección al Medio Ambiente, que es la encargada de implementar las decisiones del ejecutivo y el legislativo, teniendo además capacidad propositiva, es complementado con el de las autoridades regionales y municipales.

## RESULTADOS Y TENDENCIAS

[Se han logrado avances considerables en la reducción de los niveles de concentración de  $\text{SO}_2$ , los que a partir de la década del 80, se encuentran sistemáticamente bajo el estándar de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Prácticamente, ya no constituyen riesgo significativo para la salud de la población.] Gracias a las medidas señaladas más arriba, se ha logrado reducir el nivel de concentración promedio de  $\text{SO}_2$  en el aire, a un tercio de lo que era en 1970. En términos de emisiones, éstas han disminuido en un 66%

respecto a 1980, registrándose un volumen cercano a las 87 mil toneladas (Swedish Environmental Agency, 1991).

Los niveles de concentración de  $\text{NO}_x$  y plomo también se encuentran bajo la norma, si bien en el caso del  $\text{NO}_x$  la tendencia creciente en el parque vehicular ha impedido logros sustanciales y sostenidos. De hecho, las emisiones han tendido a estabilizarse y, en 1989, alcanzaban las 384 mil toneladas ( $\text{NO}_2$ ).

Los niveles de concentración de ozono han tendido a sobrepasar el estándar respectivo, en tanto las emisiones de CO y HC provenientes de vehículos han disminuido significativamente.

[No obstante estos éxitos, se teme que el continuo crecimiento del parque vehicular compensará con creces el efecto positivo de estas medidas. A las dificultades que entraña el control de esta fuente de contaminación, se añade el hecho de que al igual que en Estados Unidos, las grandes fuentes están prácticamente controladas y el gran desafío es el control de las fuentes pequeñas. Finalmente, se añade el fuerte impacto que tienen las emisiones de los países vecinos sobre los niveles de contaminación atmosférica.]



## ESTADOS UNIDOS Y EL CASO DE DENVER

Estados Unidos es uno de los países con mayor experiencia en el control de la contaminación. A continuación, se presenta una descripción sucinta de la estrategia seguida por este país en los últimos veinte años, para luego referirnos específicamente al caso de la ciudad de Denver.

[Las primeras normas y leyes para controlar la contaminación del aire, estuvieron orientadas a regular las emisiones de humo, y fueron promulgadas en las ciudades de Chicago y Cincinnati, en la década de 1880. A nivel estatal, la primera iniciativa fue la de Ohio, en la década de 1890, la que perseguía fines similares.]

[Leyes más comprensivas fueron dictadas por estados como Oregón, en 1952, tendientes a controlar el problema de la contaminación atmosférica en un sentido amplio, creando además la primera agencia estatal para el control de la contaminación del aire.]

[El reconocimiento de la necesidad de abordar un problema que amenazaba hacer crisis en varios puntos del país llevó a formular legislaciones a nivel federal y sustituir así un esquema que, hasta entonces, había descansado en la iniciativa de los estados y de los gobiernos locales.]

[La primera ley federal fue la Clean Air Act de 1963, que autorizaba al Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos a estudiar el problema y proporcionar ayuda económica y entrenamiento a las agencias estatales y locales. No fue sino hasta el dictado de la Clean Air Act (CAA) de 1970, que se iniciaron acciones concretas para



[abordar sistemáticamente el problema. Si bien la CAA de 1970, delegaba en los gobiernos estatales y locales la responsabilidad por la prevención y el control de la contaminación, al mismo tiempo otorgaba al gobierno federal, a través de la **Environmental Protection Agency (EPA)**, una serie de atribuciones para establecer estándares de calidad del aire a nivel nacional y las regulaciones para alcanzarlos.]

[El foco de dichos estándares fueron los llamados **criteria pollutants**, es decir aquellas sustancias contaminantes de alta frecuencia en el ambiente que, si bien en bajas concentraciones no ocasionan mayores daños a la salud o al ambiente, en concentraciones masivas pueden originar serios daños. Como tales se identificaron el ozono, el  $\text{SO}_2$ , las partículas, el CO, el  $\text{NO}_x$  y el plomo.] En un comienzo los estándares relativos a partículas correspondían al volumen total de partículas suspendidas. En 1987 se estableció un nuevo estándar relativo a las partículas de diámetro menor que 10 micrones-PM10.

[Establecidos estos estándares, la responsabilidad de preparar un Plan Estatal de Ejecución que identificara medidas para controlar las emisiones de las fuentes fijas y satisfacer los estándares nacionales, quedó en manos de los estados y gobiernos locales. Los estados pueden modificar los estándares de calidad del aire siempre que sean más estrictos que los federales. Estos planes deben contar con la aprobación de la EPA para su implementación. En caso de que los estándares de calidad del aire no sean alcanzados, los estados están obligados a desarrollar nuevos planes. Si las metas no son alcanzadas dentro de los plazos establecidos por la CAA, los estados corren el riesgo de perder el financiamiento estatal para proyectos tales como la construcción de carreteras, lo que en la práctica ha resultado un excelente incentivo.]

[Tanto la EPA como los gobiernos locales controlan los niveles de emisión de plantas e industrias. Cerca de 30.000 fuentes son reguladas por los estados.]

Sin embargo, más de la mitad de la contaminación del aire proviene de fuentes móviles. La contribución de este tipo de fuentes es especialmente importante en el caso del CO,  $\text{NO}_x$ , partículas, plomo y compuestos orgánicos. Estos últimos, aún cuando no se consideraron dentro del listado original de contaminantes, también son controlados, debido a su participación en la formación de ozono.

[En este caso, la CAA optó por dejar en manos del gobierno federal la responsabilidad de definir los estándares de emisión para los vehículos, mediante el Programa Federal de Control de Vehículos Motorizados. Estos estándares incluyen niveles de CO,  $\text{NO}_x$ , compuestos orgánicos, partículas y evaporación de combustible. Los fabricantes están obligados a incorporar estos estándares en el diseño de los vehículos.]

Los estados y gobiernos locales son los encargados de los programas de inspección y mantención para controlar que, efectivamente, estos estándares sean cumplidos.

[Además del control existente sobre los *criteria pollutants*, la CAA estableció estándares de emisión para contaminantes tóxicos tales como el asbesto, el mercurio, el arsénico, el benceno y otros. De acuerdo a las modificaciones de la CAA realizadas

en 1990, esta lista debería ampliarse rápidamente, sobrepasando el centenar las sustancias que serán controladas por sus efectos tóxicos.]

Si bien las políticas de control de la contaminación se encuentran en estos momentos en un proceso de revisión y crítica, a la fecha se han logrado considerables avances en ciertas áreas, especialmente si consideramos el crecimiento que, entre tanto, ha experimentado la economía y la población.

[Hay coincidencia en señalar que, entre los logros, el más destacable es el de plomo, fruto del programa gradual de su eliminación en la gasolina. Se pasó de 1 galón a 0,5 en 1985, y a 0,1 en 1986. En forma paralela a la reducción del contenido de plomo en la gasolina, se procedió a exigir la producción de vehículos que usaran sólo gasolina sin plomo. Entre 1977 y 1986, los niveles de plomo en el ambiente cayeron en un 87%, en tanto los niveles de emisión lo hicieron en un 94%.]

[En general, durante esos años se constata una caída de los niveles de contaminación del aire. Las partículas disminuyeron en un 23%, debido tanto a la instalación de equipos de control como a la menor actividad económica registrada a comienzo de los 80. Los niveles de  $\text{SO}_2$  descendieron en un 37%, gracias al control de las fundiciones y de las plantas termoeléctricas, encontrándose, en 1983, por debajo del estándar nacional. Los niveles de  $\text{NO}_x$  bajaron en un 14%, bastante por debajo de las normas nacionales de casi todas las regiones del país, hecho notable si se considera el crecimiento que tuvo el parque automotriz durante ese período. Los niveles de CO y de ozono cayeron en un 32% y un 13% respectivamente, entre 1979 y 1985, gracias al programa Federal de Control de Vehículos Motorizados y los controles efectuados en fuentes fijas.]

[Sin embargo, en ciertas áreas urbanas como Los Angeles y Denver, los estándares nacionales siguen siendo sobrepasados. En estos casos, el ozono, las partículas y el CO han sido las fuentes principales de problemas para la autoridad.]

## CARACTERIZACIÓN DE LA SITUACIÓN

[Denver disputa los primeros lugares en el ranking de ciudades con problema de contaminación junto con Los Angeles. Si bien el tamaño de la ciudad es significativamente menor en términos de población y actividad económica, las particulares condiciones geográficas, climáticas y económicas de la zona determinan que los niveles de contaminación en Denver lleguen con frecuencia a exceder las normas de calidad del aire de Estados Unidos, especialmente en el caso del CO, el ozono y las partículas. Algo similar sucede con ciudades cercanas a Denver, como Fort Collins, Colorado Springs o Boulder] (Rocky Mountain News, Colorado, 9 de Abril de 1987).

[Denver, capital del estado de Colorado, se encuentra ubicada en la base de un río, con las Montañas Rocallosas a sus espaldas, formando una imponente muralla que detiene la libre circulación del aire. Se sitúa, además, a una milla de altura, lo que implica una deficiencia de 18% de oxígeno en el aire respecto al nivel del mar.] (Esto



[rasgos geográficos constituyen una de las causas principales de los problemas de contaminación atmosférica que enfrenta Denver, igualmente presentes en los casos de Ciudad de México y de Santiago]

La minería, la agricultura y la ganadería son las principales actividades productivas que se desarrollan en la zona, la que se caracteriza por tener un ambiente más bien rural, con baja densidad poblacional. No obstante, es un área de gran crecimiento, especialmente en términos del flujo de personas que migran desde otros estados, atraídos por la actividad económica, el estilo de vida y por la belleza de sus escenarios naturales.

[El área metropolitana de Denver tiene una población de algo más de 2 millones de personas, ocupadas principalmente en empresas relacionadas con la producción de minerales y de energía, así como en oficinas del gobierno.]

[El número de vehículos registrados en el área es de alrededor de 2 millones, cifra que refleja un crecimiento superior al 100% en las últimas dos décadas.] En cuanto al número de millas diarias recorridas, éste es alrededor de 30 millones, lo que prácticamente triplica las cifras correspondientes a comienzos de la década de 1970 (The Denver Post, Colorado, 5 de noviembre de 1989).

[En invierno, los problemas de contaminación por partículas y CO se agravan, debido a las inversiones térmicas. En verano, la humedad hace lo suyo en términos de disminuir la visibilidad al combinarse con las partículas, en tanto el NOx genera ozono por la mayor intensidad de la luz.]

Denver ha sido una de las áreas que más ha demorado en cumplir con las normas de calidad del aire, y las violaciones a ellas han sido frecuentes. Asimismo, en varias oportunidades, se ha llegado a niveles de alerta (por ejemplo en diciembre de 1979 y en noviembre de 1982). Esto sucede aún cuando el nivel de cumplimiento de las fuentes emisoras se ubica sobre el 90%.

[Por ejemplo, el límite federal para el CO es de 9 ppm. Denver ha violado dicho estándar innumerables veces, registrando niveles de 24 ppm, sólo inferiores a los registrados en Los Angeles.] Las regulaciones federales permiten una violación al año y, violaciones reiteradas constituyen motivo para que el gobierno central elimine el subsidio federal para la construcción de carreteras y otros.]

Tabla N° 10.16: Número de días en que Colorado violó el estándar para CO.

1980	60	1985	33
1981	60	1986	32
1982	57	1987	22
1983	42	1988	10
1984	39		

Fuente: Rocky Mountain News, Colorado, 8 de octubre de 1989.

[Los principales responsables de las emisiones de CO son el flujo vehicular (estimaciones aseveran que originan el 75%) y la calefacción a leña.]

Tabla N° 10.17: Responsables de la contaminación por CO.

(porcentajes)	
Vehículos	75
Estufas a leña y chimeneas	16
Industrias	7
Aeropuertos	1
Otros	1

Fuente: Rocky Mountain News, Colorado, 8 de octubre de 1989.

[El ozono también es un problema que ha concentrado la atención de las autoridades y de la opinión pública. Su origen se encuentra en las emisiones de los escapes de los vehículos, en las emisiones evaporativas de los depósitos de gasolina, de solventes y de los líquidos de limpieza, los que al reaccionar con el NOx forman ozono.] Este es un problema que se agudiza en el verano cuando la luz del sol es más intensa y la temperatura atrapa la contaminación en el área.]

Las partículas, por otra parte, constituyen un problema serio para Denver, y es usual que se violen sistemáticamente las normas correspondientes a este contaminante. Este es un problema al cual se comenzó a dar importancia en la década de 1980, cuando se reconoció que, al margen de los éxitos que pudiesen lograrse en el control de contaminantes, tales como el ozono o el CO, el problema de las partículas iba en aumento, amenazando duplicarse hacia el año 2000.

[El problema de la famosa *brown cloud*, o nube café, es originado por la alta concentración de partículas, gases y humedad. La combustión de leña para calefacción, las industrias como refinerías de petróleo o las canteras, los caminos pavimentados, la minería, la agricultura, las construcciones y los vehículos, especialmente los de motores diesel, son todos factores que contribuyen a su formación. También hay un componente natural importante, debido a las características de la zona.]

Tabla N° 10.18: Responsabilidad en la "brown cloud".

	%		%
Quema de madera	24	NO <sub>2</sub>	12
Emisiones de vehículos	22	Polvo natural	8
Polvo	13	Sulfato de amonio	7
Nitrato de amonio	13	Part. de plantas de energía	1

Fuente: Rocky Mountain News, Colorado, 8 de octubre de 1989.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> generadas por procesos de combustión como la calefacción, las plantas de energía, los vehículos y los aviones, contribuyen tanto a la formación de la nube café como al ozono. En este caso, Denver también ha violado los estándares nacionales.

Otros problemas como el SO<sub>2</sub>, proveniente fundamentalmente de las plantas de energía, de las refineras de petróleo y de las industrias, están bajo control en Colorado y el cumplimiento de estas normas ha sido impecable.

## POLITICAS E INSTITUCIONALIDAD

El primer conjunto de estrategias adoptadas por las autoridades del estado y la ciudad para disminuir sistemáticamente los niveles de contaminación descansó en la reducción del tránsito vehicular, la restricción de la quema de madera, la disminución de las emisiones de las plantas de energía y en el control de las emisiones de los motores diesel. La disminución de las emisiones de CO y ozono fueron el objetivo central de estas estrategias.

[En general, la filosofía seguida por las autoridades de Colorado y Denver ha sido la de persuadir a la población acerca de la conveniencia de adoptar medidas de control. Debido a la historia e idiosincrasia de los ciudadanos del estado, gran parte de las medidas son de carácter voluntario. La educación y la participación se estimaron como fundamentales en el marco de esta estrategia y han jugado un rol central en la búsqueda del apoyo de la ciudadanía. Sólo en 1988, se invirtieron cerca de 250 mil dólares en campañas para incentivar la reducción del uso de vehículos privados (The Denver Post, Colorado, 17 de octubre de 1989). Esto contrasta con lo que podemos observar en California y Los Angeles, donde las medidas han sido de carácter coercitivo.]

[En el caso de la reducción del flujo vehicular, se sugirió a los conductores que dejaran sus autos en la casa una vez a la semana, así como en los días en que la contaminación era particularmente alta.] Fue la llamada Better Air Campaign, iniciada en 1984 y finalizada en 1989.

Como una muestra del grado de efectividad de estas medidas puede señalarse

que durante 1986 se logró una caída del 8% en el número de millas manejadas y los niveles de emisión de CO con origen en el tránsito vehicular, disminuyeron en un 9%. En años posteriores se verificó un estancamiento de este índice, si bien el número de vehículos registrados ha seguido aumentando (entre 1980 y 1989, el número de vehículos aumentó en 400 mil. The Denver Post, Colorado, 5 de noviembre de 1989).

[Estas medidas han sido acompañadas de vías preferenciales para los vehículos del transporte público, parquímetros en zonas céntricas, e incentivos para el uso colectivo de vehículos particulares (carpooling). Además, ocasionalmente, se ha utilizado el cambio de horarios como forma de evitar que los períodos de mayor flujo vehicular coincidan con los períodos en que, debido a la luz solar, tiende a incrementarse el nivel de ozono.]

[En la línea más coercitiva se ha desarrollado un programa de inspección y mantenimiento de vehículos que incluye el control de los niveles de emisión de los escapes de los vehículos, mediante revisiones anuales. Pero no debe olvidarse que las estrategias de control de las emisiones vehiculares son definidas a nivel federal] y que el estado y los gobiernos locales están obligados a implementarlas. Se estima que este sistema ha logrado la reducción de la contaminación por CO en un 15%.

En el tema de la quema de madera, el estado de Colorado [incentivó a las municipalidades a que establecieran estándares de emisión para los fabricantes de estufas y chimeneas, lo que se podría complementar, eventualmente, con prohibiciones de quema de madera en los días de mayor contaminación] Denver y otras ciudades del área incorporaron esta clase de medidas en 1986. Las restricciones permitieron disminuir el nivel de CO y de partículas en un 3% y un 6%, respectivamente, durante ese año. Su eventual ampliación a otras ciudades podría generar una reducción de otro 10%.

[Otros componentes de la estrategia incluyeron el mejoramiento de la calidad de los combustibles. Por ejemplo, el uso de gasolina sin plomo, una de las estrategias más exitosas adoptadas por Estados Unidos en el control de la contaminación atmosférica, ha sido un elemento de mejoramiento de la calidad del aire en Denver; aunque, nuevamente, debe recordarse que este programa es de carácter federal.] En este caso, los niveles de contaminación han logrado ubicarse por debajo de las normas nacionales de calidad del aire. Adicionalmente, se han utilizado gasolinas oxigenadas y se ha experimentado con el uso de alcohol como combustible. Los vehículos del gobierno estatal utilizan mezclas especiales, con el objeto de demostrar que estos combustibles son seguros para la eficiencia del motor.

Las plantas de energía han sustituido carbón por gas, logrando la reducción de la mitad de sus emisiones.

Por último, las medidas anteriores han sido complementadas con sistemas de alerta que se ponen en marcha cada vez que la información disponible pronostica que los niveles de contaminación puedan llegar a ser críticos por más de 12 horas.

En 1989, se dio comienzo a una nueva fase de control de la contaminación del aire. Los lineamientos del plan comprenden una orientación más comprensiva del



problema de la contaminación, cuestión que significa incluir temas como el efecto invernadero. Asimismo, busca formar una conciencia medioambiental en los ciudadanos, que dé un papel importante al reciclaje, a la conservación de la energía y a otros aspectos del estilo de vida.

Un aspecto novedoso del nuevo programa es su énfasis en los aspectos estéticos de la contaminación del aire, y la idea de definir indicadores de visibilidad de 32 millas. En este marco, a partir de 1993, toda empresa que desee instalarse en Denver tendrá que demostrar que sus emisiones no interferirán con el estándar de visibilidad.

Es interesante notar que, en general, el programa se basa igualmente en la cooperación voluntaria, si bien contempla la posibilidad de que, ante resultados deficientes, se proceda a utilizar regulaciones más estrictas y reducciones forzosas en el número de viajes. El programa incluye la prohibición de la quema de madera en días críticos, teléfonos especiales para denunciar vehículos con emisiones visibles y otros, tales como programas especiales de educación para los estudiantes.)

El Consejo Metropolitano para la Calidad del Aire es el responsable del diseño de los planes estatales para enfrentar el problema de la contaminación atmosférica.

La Comisión para el Control de la Calidad del Aire, del Consejo Regional de Gobiernos de Denver, es la agencia local de planificación de la calidad del aire. El control mismo es desarrollado por la División de Control de la Contaminación del Aire del Departamento de Salud.

Aparte de estas instituciones relacionadas con el gobierno estatal y local, encontramos las oficinas regionales de la EPA.

## RESULTADOS Y FUTURAS TENDENCIAS

A partir de 1976, se ha logrado una caída importante en los niveles de contaminación y, al menos, el número de violaciones y situaciones de alerta ha disminuido significativamente. Las últimas han comenzado a espaciarse y, mientras en 1978 se produjeron 6 alertas, entre 1979 y 1982 hubo apenas una.

Sin embargo, los resultados están lejos de ser aceptables. Entre 1981 y 1985, Denver redujo sus niveles de CO en un 13%, en tanto el promedio nacional fue de un 17%, y la situación continúa siendo preocupante en ciertas épocas del año.

Los nuevos avances en el control de la contaminación requerirán de la focalización en el tema del transporte y fuentes pequeñas. La industria de gran tamaño ya ha hecho lo suyo en materia de control de la contaminación y es irrelevante como fuente en la actualidad. Se estima que la sumatoria de fuentes pequeñas sobrepasa el total de emisiones de las 400 fuentes mayores listadas por la División de Control de la Contaminación del Aire. Por otra parte, una reducción en un 50% de las emisiones de chimeneas y estufas implica una reducción de apenas 10% en el problema de la ciudad.

La situación del flujo vehicular es preocupante, ya que si bien los niveles de emisión han disminuido, el número de vehículos y de millas recorridas aumenta

constantemente. De continuar así las cosas, en el mejor de los casos (por ejemplo, el uso del estándar de emisiones californiano), apenas mantendría el smog en los niveles actuales.

Se ha discutido bastante sobre la conveniencia de utilizar preponderantemente la educación y el compromiso individual de los ciudadanos como forma de controlar el problema, particularmente cuando la situación tiende a tornarse crítica, en vez de exigir medidas más radicales e innovadoras. El desarrollo de tecnologías que puedan reducir el nivel de contaminación generado por los vehículos tiene un límite. Por otra parte, es posible que las medidas más fáciles de aplicar ya hayan sido empleadas. Por delante queda entonces el difícil desafío de alterar el estilo de vida de los ciudadanos, acostumbrados, como en Los Angeles, al uso de sus vehículos como símbolo de identidad.

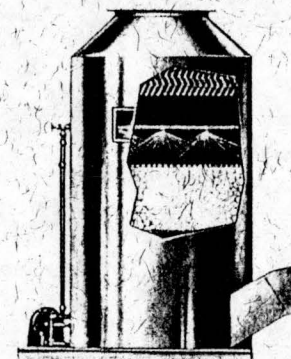
Las dudas acerca de una estrategia basada en la cooperación de los ciudadanos aumentan cuando se observa la efectividad de los programas federales, tales como la eliminación del plomo de la gasolina o el control de las emisiones vehiculares.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CEPAL, 1991 a) "Apuntes sobre Contaminación Atmosférica. Presentación de Casos y Datos de Algunos Países Seleccionados". CEPAL, Seminario Políticas para la Gestión de los Residuos Urbanos e Industriales, Santiago de Chile, 1 al 3 de Julio de 1991.
- CEPAL, 1991 b) "El Caso de Ciudad de México". Seminario Políticas para la Gestión de los Residuos Urbanos e Industriales, Santiago de Chile, 1 al 3 de Julio de 1991.
- CEPAL, 1991 c) "Las Leyes de Descontaminación del Aire en la República Federal de Alemania". Seminario Políticas para la Gestión de los Residuos Urbanos e Industriales, Santiago de Chile, 1 al 3 de Julio de 1991.
- City of Stockholm, 1992. "Stockholm Environmental Balance in 1991".
- Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, 1992. "¿Qué estamos haciendo para combatir la contaminación del aire en el Valle de México? Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México.
- Ely, Aloisio, 1990 Economía do meio ambiente. Secretaria de Coordenacao e Planejamento. Fundacao de Economia e Estatística. 4a edición. Porto Alegre.
- Guerra, Luis Manuel, 1989 "Política de Calidad del Aire en México", En, "Hacia una Conciencia Ecológica. Políticas de Calidad del Aire en América Latina". Helmut Weidner y Toews H. Hilker ed. Fundación Friedrich Ebert. Editorial Nueva Sociedad.

- Guzmán, Francisco, 1992 "Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México". Instituto Mexicano del Petróleo-Los Alamos National Laboratory. Presentación al Taller Internacional: Opciones para Solucionar la Contaminación. Santiago de Chile, 2 al 5 de Diciembre de 1992.
- Hassel, Roland. Presentación al Taller Internacional: Opciones para Solucionar la Contaminación. Santiago de Chile, 2 al 5 de Diciembre de 1992.
- "Horizontes Urbanos. Ideas e Innovaciones", Vol 14, No 9, Noviembre de 1990.
- Instituto Sueco, 1985 "Información sobre Suecia. La Protección del Medio Ambiente en Suecia".
- Lacy Tamayo, Rodolfo, 1992 "El Transporte y la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México". En Vialidad y Transportes Metropolitanos. Editorial Cambio XXI.
- Lazzarini, Walter, 1991 "Controle e Prevencao da Poluicao do Ar". Latin American Environment and Hemispheric Technological Cooperation Conference and Exhibition, 17 al 19 de Noviembre de 1991. The Institute of the Americas. La Jolla, California.
- Ministry of the Environment. 1991 "The Swedish Environment".
- Niquist, Gunnar, Institute of Applied Environmental Research, University of Stockholm, Suecia. "Economic Instrument in Swedish Environmental Policy", presentación al Taller Internacional: Opciones para Solucionar la Contaminación. Santiago de Chile, 2 al 5 de Diciembre de 1992.
- Rivelli, Vincenzo, 1990 "Sistemas Operacionales Utilizados en el Control de las Fuentes Estacionarias". En, "Protección del Medio Ambiente". Ed. Herman Schwember. Seminario Tecniberia, CEPAL. Santiago de Chile.
- Seidler, Rolf, Federal State Ministry for Environment, Regional Planning and Agriculture, North Rhine-Westfalia, RFA. "Contaminación Atmosférica en la zona del Ruhr", presentación al Taller Internacional: Opciones para Solucionar la Contaminación. Santiago de Chile, 2 al 5 de Diciembre de 1992.
- Swarc, Alfred y Eduardo Licco, 1989 "Una Evaluación del Control de la Contaminación Atmosférica en Brasil". En, "Hacia una Conciencia Ecológica. Políticas de Calidad del Aire en América Latina". Ed. Helmut Widner y Toews H. Hilker. Fundación Friedrich Hebert. Editorial Nueva Sociedad.
- Swedish Environmental Agency, 1991. "Review of Strategies and Policies for Air Pollution Abatement".
- Swedish Environmental Agency, 1990, "Air Pollution '90".
- Victorin, Katarina, 1992. Swedish Environmental Agency, Suecia. "Health Effects of Urban Air Pollutants. Guideline Values and Conditions in Sweden". Presentación al Taller Internacional: Opciones para Solucionar la Contaminación. Santiago de Chile, 2 al 5 de Diciembre de 1992; sesión 5.



## CAPITULO 11 TECNOLOGÍAS DE ABATIMIENTO

Willy Rutherford D.

<i>Tecnologías de abatimiento</i>	341
<i>Antecedentes generales sobre los procesos de abatimiento</i>	343
<i>Tecnología para la eliminación de gases</i>	345
<i>Tecnología para la eliminación de partículas</i>	362
<i>Conclusiones</i>	374
<i>Referencias bibliográficas</i>	375



■ **Willy Rutherford Dunker**  
 Ingeniero Químico, Universidad  
 de Concepción. Master of Science,  
 The Pennsylvania State University.  
 Posee más de 30 años de experiencia  
 laboral, en el área de gases industriales  
 y solución de problemas de Ingeniería  
 Química.  
 Docencia en las Universidades de  
 Concepción, Católica de Valparaíso y  
 actualmente, en la Universidad de Chile.  
 Cinco años de asesorías a empresas  
 en el campo de la Descontaminación  
 Ambiental, área en la que se desempeña  
 actualmente en la Empresa de Obras  
 y Montajes Ovalle, Moore S.A.

## TECNOLOGÍAS DE ABATIMIENTO

En este capítulo se analizarán las prácticas y métodos de uso más habitual en fuentes mismas de emisión para el abatimiento de los elementos contaminar atmosféricos.]

El análisis de las diversas tecnologías de abatimiento pasa, principalmente, [el tipo de contaminante a ser abatido. Estos, atendiendo a su estado físico, pueden clasificarse en: gases y vapores o partículas sólidas.]

En el caso de los contaminantes que se encuentran en gases residuales, esencial identificar primero el gas residual que será sometido a limpieza, para llegar a una selección adecuada de la tecnología a utilizar. Puede existir una relación directa entre los contaminantes contenidos y el rendimiento característico de los equipos disponibles comercialmente para la eliminación de esos contaminantes. [La selección del equipo y la garantía de su eficiencia se basan en el conocimiento preciso acerca de las operaciones del proceso que debe ser descontaminado.]

[Para un proceso determinado, es indispensable medir el flujo de gas a ser tratado, incluyendo las diversas condiciones en las cuales se desarrolla la operación e identificar y medir los contaminantes contenidos y el material particulado existente mediante técnicas isocinéticas. La composición del gas, su temperatura, presión, humedad, deben ser medidos simultáneamente. Las muestras de polvo deben analizarse para establecer con precisión la cantidad presente y las características no relevantes.] Es necesario, además, interiorizarse del proceso a descontaminar, manera de poder detectar información que, aparentemente, es irrelevante, pero que puede llegar a tener gran importancia. [Así por ejemplo, la presencia de gotas de aceite en el gas, de humedad, de corrosividad, u otros factores, pueden afectar el normal funcionamiento de la futura instalación de purificación.]

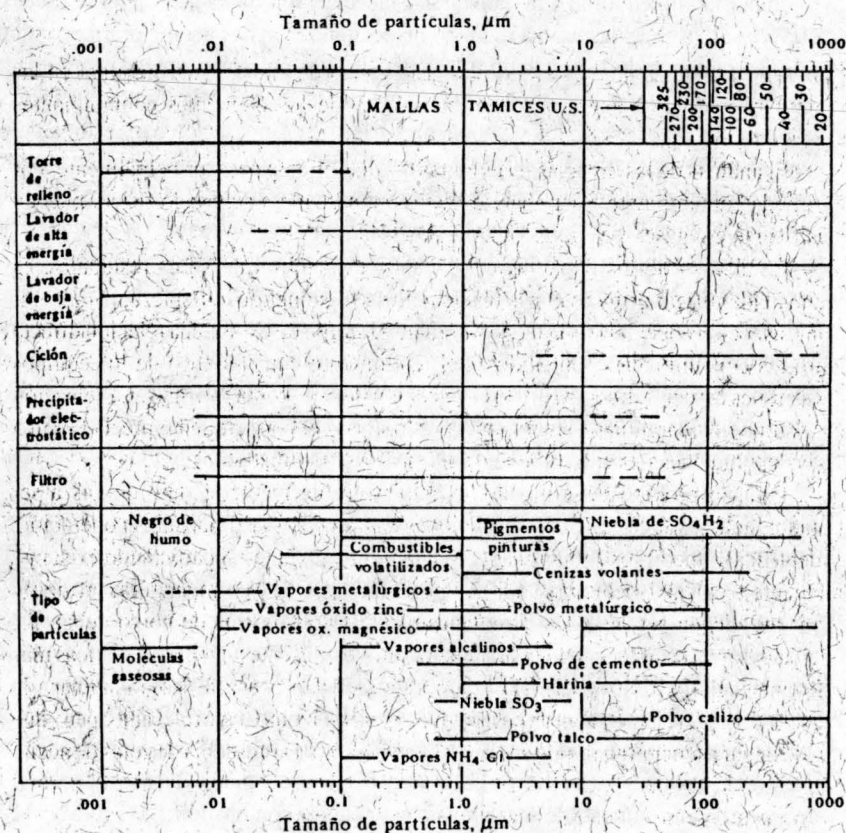
Una vez caracterizado el problema, es decir, el gas residual a ser descontaminar

nado, en términos de datos confiables y pertinentes, se puede calcular la eficiencia requerida en el proceso por el equipo de control de emisiones. Esta segunda etapa, permitirá completar la determinación del tipo de equipo que se requiere.]

[Es importante destacar que los contaminantes gaseosos tienen un tamaño comprendido entre los  $10^{-3}$  y los  $10^{-5}$  micrones. Para una captura adecuada de estos contaminantes se debe tener en cuenta, además de sus dimensiones, otras características, tales como la naturaleza química, su solubilidad, combustibilidad, y otras.]

Desde el punto de vista de su captación, la característica más importante de las partículas es el tamaño. Normalmente, los elementos contaminantes industriales presentan tamaños que oscilan entre los  $10^{-2}$  y los  $10^{-3}$  micrones, estimándose que el 80% de los mismos están comprendidos entre los  $10^{-1}$  y los  $10^{-2}$  micrones, tal como se presenta en la Tabla N° 11.1.

Tabla N° 11.1.



## ANTECEDENTES GENERALES SOBRE LOS PROCESOS DE ABATIMIENTO

La separación de los contaminantes de la corriente gaseosa que los arrastra puede realizarse con diferentes mecanismos empleados aisladamente o en conjunto. [Estos mecanismos se clasifican en dos grupos, según se apliquen a contaminantes gaseosos o sólidos (partículas). Para los primeros, el proceso puede implicar modificaciones en su naturaleza, como sucede en la combustión catalítica. Para los segundos, el proceso es de tipo físico, sin que ello, en la mayoría de los casos, signifique variación en la naturaleza química del contaminante.]

### SEPARACION DE GASES

Para la separación de los contaminantes gaseosos, se emplean principalmente las siguientes técnicas:

#### Absorción

Es un proceso de transferencia de materia entre un gas y un líquido, en el cual el contaminante simplemente se disuelve en el líquido absorbente, o reacciona con él.

#### Adsorción

En este caso, la transferencia de materia se produce entre un gas y un sólido y, por regla general, no hay reacción química.

#### Combustión

Cuando los contaminantes son oxidables, para eliminarlos se recurre frecuentemente al mecanismo de la combustión. Las dos formas más empleadas son la combustión ordinaria o incineración y la combustión catalítica. El segundo tipo se utiliza más en los casos de concentraciones muy bajas de contaminantes.

#### Reducción catalítica

En cierto modo, ésta es una técnica opuesta a la combustión, ya que supone el paso de los contaminantes a formas más reducidas. La transformación se lleva a cabo con catalizadores específicos, generalmente de tipo metálico.

### SEPARACION DE PARTICULAS

Los principales mecanismos empleados en la separación de partículas son los siguientes:



### Gravedad

Las partículas sólidas y líquidas de mayor tamaño (superior a  $50 \mu\text{m}$ ), pueden sedimentar de forma efectiva si se disminuye la velocidad de la corriente gaseosa que las envuelve.

### Inercia

El fenómeno de inercia se utiliza para modificar la línea de progresión de la corriente gaseosa, de forma que la desviación que experimentan las partículas difiere marcadamente de ella y se consigue así una separación completa de ambos componentes.

### Fuerza centrífuga

Si la modificación de la línea de progresión de la corriente gaseosa es de forma circular, las partículas se separan de ella debido a la acción de la fuerza centrífuga.

### Intercepción

Consiste en la colisión de la partícula con un obstáculo situado de tal modo que éste la retiene.

### Precipitación electrostática

La separación se efectúa mediante la carga eléctrica del contaminante y su paso posterior a través de un campo eléctrico que lo desvía y obliga a sedimentar.

### Difusión browniana

Puede considerarse como un caso especial de intercepción, donde la colisión de las partículas con el obstáculo se debe a la energía que les transmiten las moléculas gaseosas como resultado de los choques producidos a consecuencia del movimiento browniano. Este mecanismo es viable tan sólo en el caso de partículas de tamaño extraordinariamente pequeño. Si el diámetro es inferior a  $10^{-1} \mu\text{m}$ , el grado de separación por difusión es superior al rendimiento debido al impacto.

### Difusión ultrasónica

Los ultrasonidos favorecen las colisiones y aglomeración de las partículas con el consiguiente aumento de tamaño y, por lo tanto, con una mayor eficacia de la separación. Este método, no es propiamente un mecanismo de separación, sino que consiste, más bien, en un proceso auxiliar.

Todos los mecanismos citados, constituyen los fundamentos operativos de los equipos depuradores. En algunos casos, estos equipos se basan en un sólo mecanismo, mientras que en otros intervienen varios.

## TECNOLOGIA PARA LA ELIMINACION DE GASES

Los equipos de tratamiento de gases, en los cuales los contaminantes están presentes en forma gaseosa, se clasifican de acuerdo con el mecanismo físico-químico utilizado para retenerlos. Existen cinco tipos:

### EQUIPOS DE COMBUSTION

Los equipos de combustión de gases contaminantes son muy variados, sin embargo una primera clasificación permite separarlos en antorchas, incineradores térmicos, incineradores catalíticos, calderos y calefactores.

#### Antorchas

La combustión por antorchas es de tipo abierta, donde el oxígeno es suministrado por el aire en torno a la llama. Las antorchas son operadas a nivel del suelo o elevadas. Las elevadas usan a menudo inyección de vapor para mejorar la combustión, incrementando la agitación o turbulencia. Las antorchas operadas apropiadamente pueden lograr una eficiencia mínima de un 98%. En la Figura N° 11.1, se presenta un esquema de los componentes básicos de una antorcha. Se trata de un equipo poderoso para el control de emisiones y es muy aconsejable cuando las concentraciones de contaminantes están dentro de los límites de inflamabilidad y sobre todo, cuando el caudal de gases emitido está sujeto a fuertes variaciones. Este equipo puede también ser utilizado en muchos de los casos de corrientes gaseosas con presencia de elementos orgánicos no halogenados. Sin embargo, los bajos flujos volumétricos y las bajas concentraciones, son condiciones que no favorecen el uso de antorchas. En el caso de corrientes gaseosas con bajas concentraciones, los costos de combustible adicional para mantener la combustión, eliminan generalmente a la antorcha como una alternativa de control viable. Además, por ser un proceso de combustión abierta, es muy difícil y económicamente impracticable medir las emisiones desde una antorcha.

#### Incineradores térmicos

Los incineradores térmicos alcanzan también eficiencias mínimas de un 98%, si se obtienen las condiciones adecuadas de temperatura ( $750$  a  $1.000^\circ\text{C}$ ), mezclado, suficiente oxígeno y tiempo de residencia. Estos incineradores pueden ser diseñados para manipular flujos de  $0,1$  a  $250 \text{ m}^3/\text{seg.}$  ( $200$  a  $500.000$  pies cúbicos/min.). Si la corriente gaseosa tiene un valor de calentamiento inferior a  $1,87 \text{ MJ/scm}$  -metros cúbicos estándar, donde el estado estándar queda definido como  $1$  atmósfera de presión y, por lo general,  $25^\circ\text{C}$  - (o bien  $50 \text{ Btu/scf}$ , pies cúbicos estándar), se requiere de un combustible auxiliar para mantener la combustión. La Figura N° 11.2, muestra los componentes básicos de un incinerador térmico. Para aprovechar parte

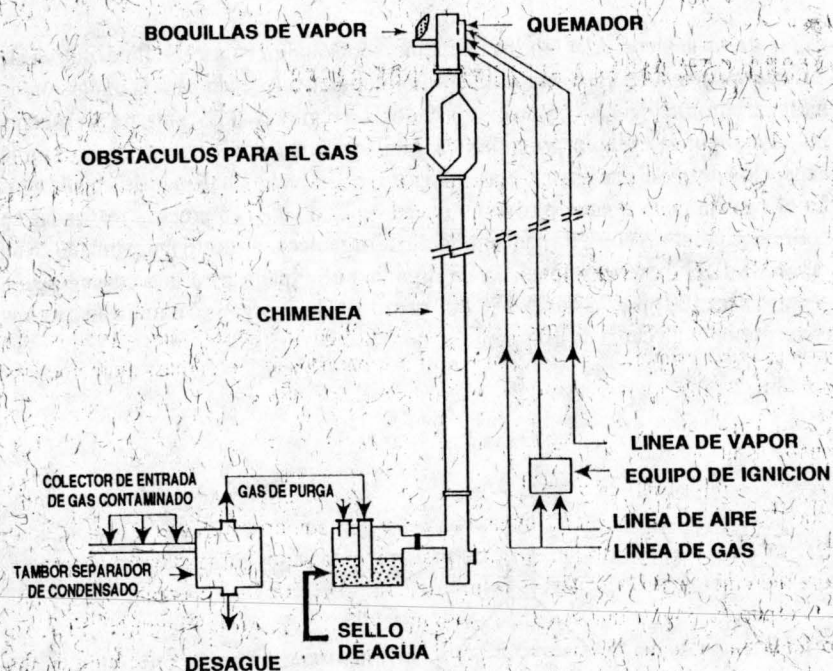


Figura N° 11.1

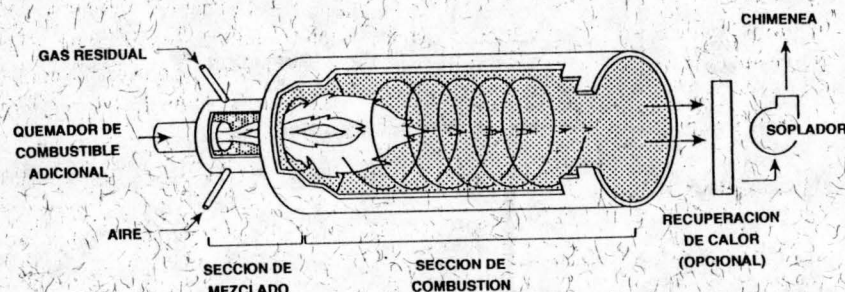


Figura N° 11.2

de la energía y no desperdiciarla, desde un incinerador térmico, se puede utilizar una unidad-recuperadora de calor, tal como un generador de vapor.

En estudios realizados sobre estos equipos en 1983, se concluyó que, bajo un nivel de concentración crítico, la máxima eficiencia lograda por ellos decrece cuando disminuye la concentración de la corriente de entrada, debido principalmente al gran retardo en las velocidades de reacción a bajas concentraciones. Para corrientes de entrada con concentraciones inferiores a las 2.000 ppm, aproximadamente, una concentración de salida de 20 ppm es lo más bajo que se ha logrado en estos equipos. Además, para corrientes de bajas concentraciones (menores a 100 ppm), se necesitan grandes cantidades de combustible auxiliar para mantener las altas temperaturas requeridas.

Dos compañías, Smith Engineering Systems, de Ontario, Canadá, y Reeco, Morris Plains, de New Jersey, Estados Unidos, fabrican incineradores térmicos regeneradores, específicamente diseñados para corrientes gaseosas con bajas concentraciones de elementos orgánicos y comprobados en terreno para concentraciones inferiores a 100 ppm. Los incineradores regeneradores fabricados por estas compañías son similares en principio. Ambos consisten de tres lechos recubiertos con material cerámico, que son calentados y enfriados, alternativamente, durante el ciclo de intercambio de calor (ver Figura N° 11.3). La eficiencia lograda por estos incineradores es superior al 98%. El costo-eficiencia de los incineradores térmicos regeneradores varía con la concentración de entrada desde US\$ 3.700 y US\$ 5.000 por tonelada de orgánico controlado para una concentración de orgánico cercana a 100 ppm, a US\$ 38.100 y US\$ 50.900 por tonelada para una concentración de orgánico cercana a 10 ppm.

### Incineración catalítica

Los incineradores catalíticos son similares a los térmicos en diseño y operación, excepto que emplean un catalizador para aumentar la velocidad de reacción. Sin embargo, el catalizador permite que la reacción se lleve a cabo a bajas temperaturas (entre 350 y 500 °C), lo cual significa un posible ahorro de combustible. La incineración catalítica no es aplicable en forma tan amplia como la incineración térmica, debido a la gran sensibilidad que presenta a los contaminantes y a las características del proceso. Las especificaciones de diseño son importantes, por cuanto el catalizador puede ser afectado adversamente por las temperaturas, por elevadas concentraciones, por la obstrucción de material particulado o polímeros y la desactivación por halógenos o ciertos metales. Los componentes básicos de un incinerador catalítico (ver Figura N° 11.4), son similares a aquellos de un equipo térmico, excepto por el lecho del catalizador.

En los Estados Unidos hay varias compañías que fabrican incineradores catalíticos para la destrucción de vapores orgánicos. Sin embargo, sólo se encontró información sobre equipos empleados para concentraciones menores de 100 ppm, en los fabricantes ARI Technologies, Inc., Palatine, Illinois. Para la oxidación de



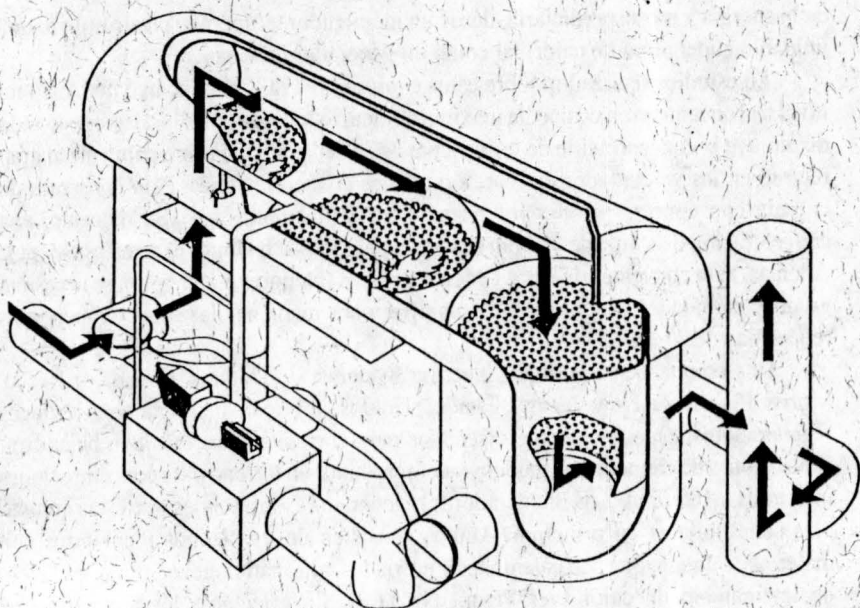


Figura N° 11.3

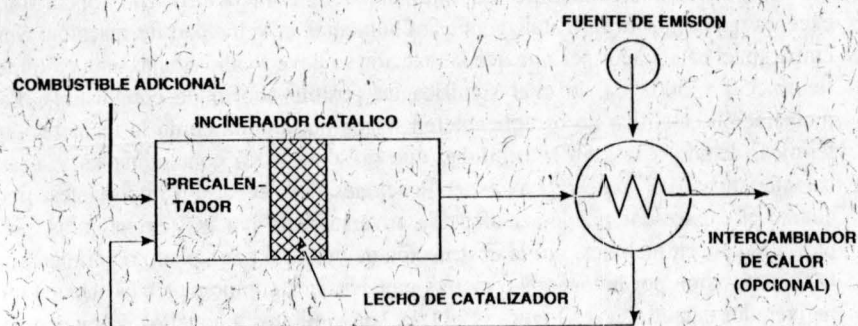


Figura N° 11.4

elementos orgánicos, ARI fabrica un incinerador catalítico de lecho fluidizado. Este sistema recurre a un catalizador de cromo-alúmina, adecuado para la oxidación de hidrocarburos halogenados y no halogenados. La Figura N° 11.5, muestra el esquema de un equipo, el cual, en principio, es similar a otros procesos catalíticos, con la excepción de que el gas fluye hacia arriba a través del lecho fluidizado del catalizador. La eficiencia de este equipo tuvo un rango de 72 a 99%, en pruebas realizadas en corrientes gaseosas con baja concentración de orgánicos. Su costo fue estimado en un rango de US\$ 5.500 por tonelada de orgánico eliminado para una concentración cercana a las 100 ppm, hasta US\$ 58.800 por tonelada de orgánico eliminado para una concentración de cerca de 10 ppm.

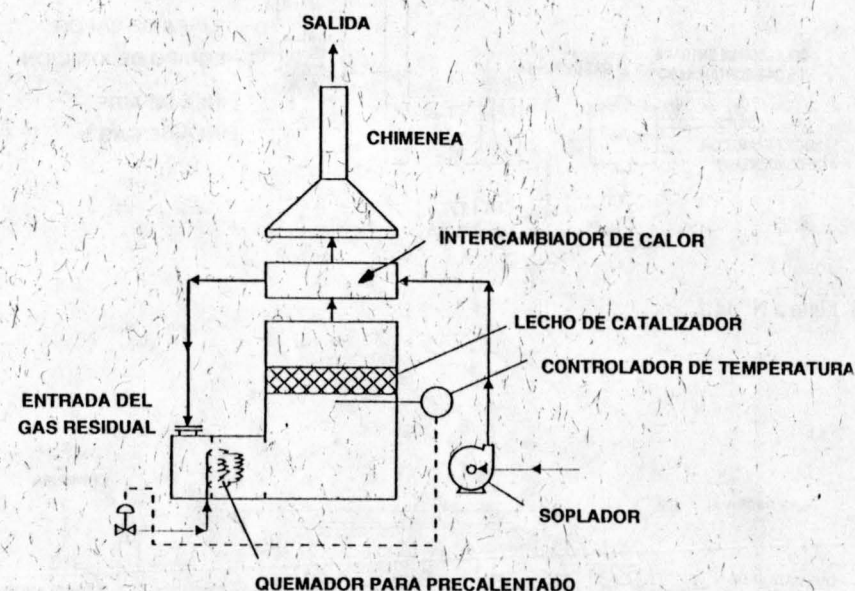


Figura N° 11.5

### Calderos y calefactores

Los calderos y calefactores pueden utilizarse como equipos de control para limitar la emisión de elementos orgánicos, incorporando la corriente gaseosa a la alimentación de combustible o conduciendo la corriente al caldero o calefactor, a través de un quemador separado. Los parámetros que afectan la eficiencia térmica de un caldero o calefactor son la temperatura de combustión, el tiempo de residencia, la concentración de entrada, el tipo de contaminante y el grado de turbulencia. Una serie

de estudios para determinar la eficiencia de estos equipos en hidrocarburos, arrojaron resultados con rangos entre el 98 y el 99%. Sin embargo, ninguna de las pruebas se realizó con corrientes gaseosas de bajas concentraciones de orgánico (menos de 100 ppm).

### EQUIPOS DE REDUCCION CATALITICA

Cuando los contaminantes se presentan en un estado de máxima oxidación, la combustión no constituye un buen sistema de eliminación y resulta, entonces, más aconsejable proceder a una reducción de tipo catalítico, donde también existe un proceso de combustión, pero de diferentes características.

Los equipos de reducción catalítica están constituidos por un reactor en cuyo interior se encuentra el catalizador. Cuando la corriente gaseosa pasa a través de él, tiene lugar la reacción catalítica que destruye los contaminantes.

Actualmente, las dos aplicaciones principales de los procesos catalíticos son los sistemas de escape de los automóviles y las emisiones industriales que contienen óxidos de nitrógeno. Aunque ambos procesos tienen un fundamento catalítico, su mecanismo no es idéntico.

Los catalizadores que hasta el momento han dado mejores resultados son los metales nobles, principalmente platino y paladio, en soportes de tipo cerámico. En la Tabla N° 11.2, se presenta una selección de estos catalizadores.

Tabla N° 11.2.

RENDIMIENTO DE VARIOS CATALIZADORES EN LA ELIMINACION DE OXIDO NITRICO (6)				
Catalizador/ Soporte	Temperatura °C	Combustible	Alimentación (ppm NO)	Eficacia (% NO eliminado)
Pd/amianto	200	H <sub>2</sub>	100	83
Pd/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	150 - 490	H <sub>2</sub>	3.000	> 89
Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	260	H <sub>2</sub>	4.000	98
Pd/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	451 - 736	CH <sub>4</sub>	3.000	> 99
Pt/torvex	155 - 471	H <sub>2</sub>	1.900	75
Pt/torvex	450 - 768	CH <sub>4</sub>	3.000	99
Pt/torvex	270 - 654	C <sub>6</sub> - C <sub>8</sub>	1.400	77
Ni/Kieselguhr	350	CO	50.000	79
C <sub>4</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	538	CO	160	≈ 100

### EQUIPOS DE ABSORCION

La absorción es una operación unitaria muy conocida en procesos químicos y es ampliamente utilizada como técnica para la recuperación de productos en la separación y purificación de corrientes gaseosas que contienen altas concentraciones de elementos orgánicos. En la absorción, los orgánicos de la corriente gaseosa son disueltos en un líquido (ver Figura N° 11.6). El contacto entre el líquido absorbente y la corriente gaseosa es realizado en torres de lavado, lavaderos, torres de relleno o columnas de platos. Esta técnica de control de emisiones es utilizada con mayor frecuencia para gases inorgánicos (ácido sulfhídrico, cloruros), que para gases orgánicos.

La absorción, como la principal técnica de control de gases orgánicos, está sujeta a varias limitaciones y problemas. Un problema es la disponibilidad de un solvente adecuado. Algunos de los solventes más corrientes que pueden ser usados en el caso de orgánicos volátiles son el agua, los aceites minerales u otros aceites no volátiles derivados del petróleo. Otro factor que afecta el uso de la absorción en el control de la emisión de orgánicos, es la disponibilidad de datos acerca del equilibrio vapor/líquido, para el caso específico orgánico/solvente en cuestión. Tales datos son necesarios para el diseño de equipos de absorción, sin embargo, no siempre se encuentran para compuestos orgánicos poco conocidos. Otra consideración en la

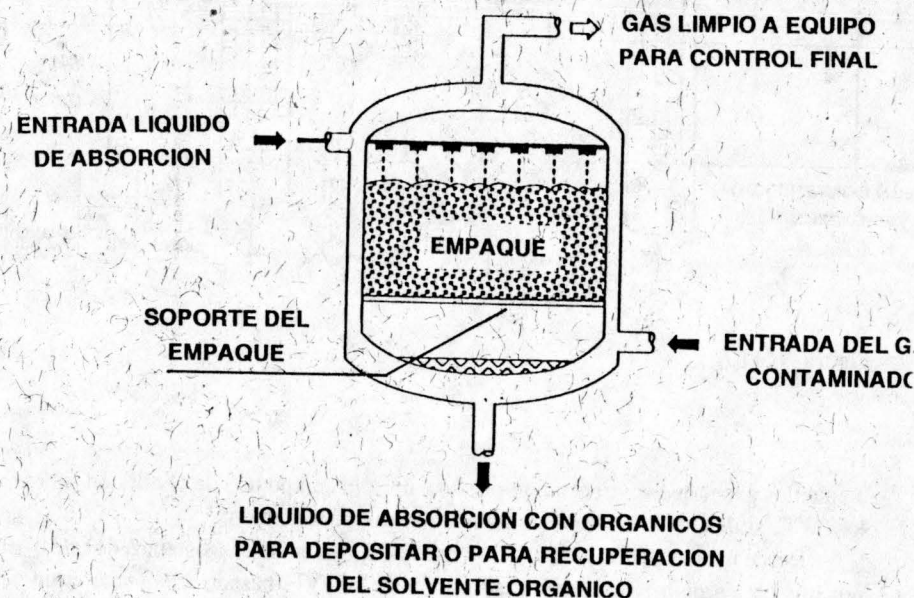


Figura N° 11.6.



aplicación de la absorción como técnica de control, es el tratamiento o disposición final del material acumulado en el elemento absorbedor.

La fábrica QVF Glastechnik, de Weisbaden, Alemania, ha desarrollado un proceso de absorción específico para remover bajas concentraciones de orgánico. El proceso es mostrado en la Figura N° 11.7. El gas que contiene el orgánico es puesto en contacto con un líquido en un absorbedor a contracorriente, el que disuelve los orgánicos. El líquido con el contaminante es entonces regenerado mediante vapor en una columna de bandas operada al vacío. El solvente líquido regenerado es devuelto a la columna de absorción. Como consecuencia de que el orgánico debe ser soluble en el líquido absorbente, la elección del líquido es crítica. El sistema de la QVF usa tetraetilenglicol dimetiléter. El proceso está limitado a orgánicos con punto de ebullición mayor de 30°C. La alta humedad del gas no afecta el proceso. Puesto que el sistema recupera los orgánicos, este proceso puede destinarse en la práctica

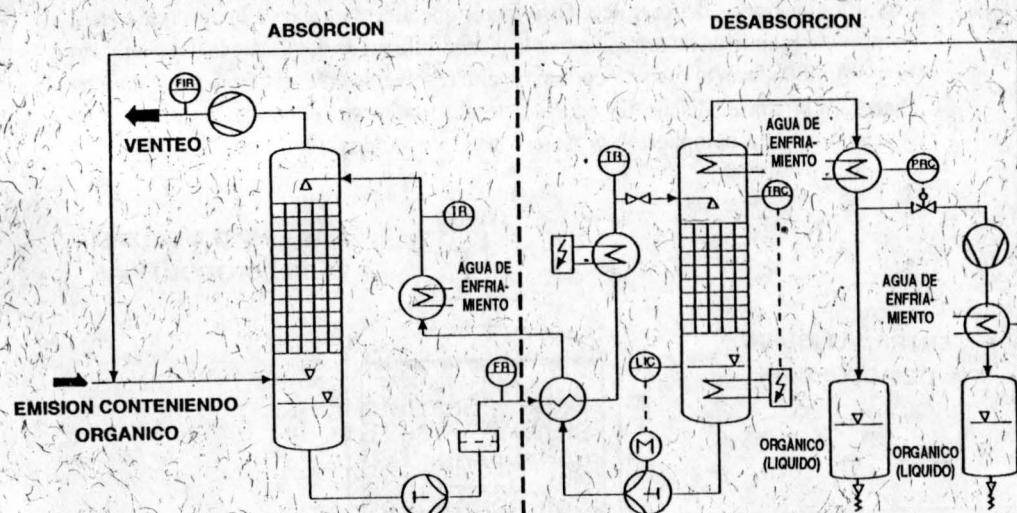


Figura N° 11.7.

a aquellos gases que contienen compuestos, no sólo con puntos de ebullición sobre los 30°C, sino a los que tienen también algún valor económico.

Desde mediados de 1991, QVF ha instalado 13 plantas con sistemas de este tipo. Los costos para el proceso de absorción de la QVF, basado solamente en información entregada por el vendedor, representan una inversión de capital de US\$ 1.1 millones para una unidad de 10.000 m³/h. Los valores de costo-efectividad que fue-

ron estimados, varían entre US\$ 3.300 y US\$ 6.700 por tonelada de orgánico removido para una corriente gaseosa de 100 ppm.

El sistema QUAD para control de orgánicos es una tecnología de absorción desarrollada y patentada por la corporación de tecnología ambiental QUAD. En principio, este es simplemente un proceso en el cual el líquido absorbente es finamente atomizado. Esta tecnología, tradicionalmente usada para controlar el olor donde la concentración puede ser sólo de unas pocas ppm, ha sido empleada recientemente para remover orgánicos/tóxicos y no tóxicos generados desde residuos líquidos.

El sistema QUAD consiste de una cámara de absorción gas-líquido en paralelo (ver Figura N° 11.8). El componente crucial de este sistema es una boquilla para atomizar el líquido, diseñada para rociar pequeñísimas gotitas de líquido, de unos 10 micrones, en forma continua a la cámara de reacción. Esto proporciona una gran área superficial en la interfase gas-líquido. Las moléculas orgánicas son absorbidas desde la fase gas hacia las finas gotas de líquido, que son agrupadas y removidas desde la base de la cámara para un tratamiento posterior. La eficiencia en la remoción de orgánico usando esta tecnología se encuentra en el rango del 60 al 100%, alcanzando con frecuencia cifras que superan el 90%. Para este estudio no se contó, prácticamente, con información de costos, sin embargo, los estudios comparativos demuestran que esta tecnología tiene costos significativamente competitivos en relación a la adsorción con carbón, y es más económica, sobre todo, que otras tecnologías disponibles para concentraciones por debajo de las 100 ppm.

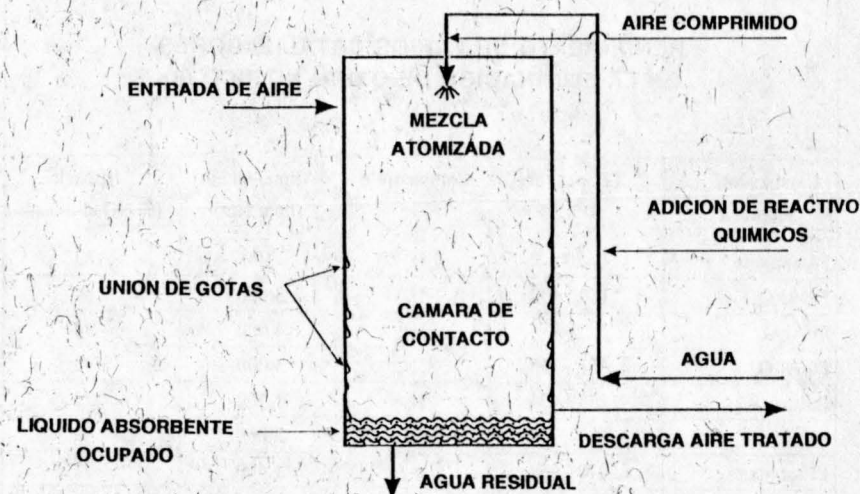


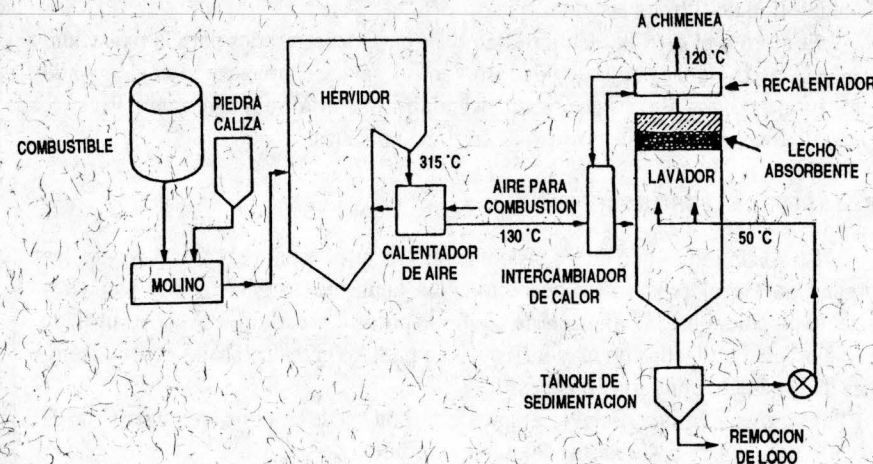
Figura N° 11.8.

## Sistemas de absorción gas-sólido para eliminación de SO<sub>2</sub>

Se han llevado a cabo muchos trabajos de absorción o de sistemas de reacción sobre fase sólida, especialmente referidos a la emisión de  $\text{SO}_2$ . En general, tales sistemas no son adecuados para emisiones reducidas y, por lo tanto, no deben ser considerados para corrientes de bajos flujos. Sin embargo, ofrecen una buena posibilidad si la operación es de altos caudales de gas con contenido importante de  $\text{SO}_2$ . Si estas emanaciones fueran descargadas directamente a la atmósfera, provocarían concentraciones elevadas del gas, por sobre las normas establecidas. Los cuatro procesos más importantes que han sido usados para eliminar el  $\text{SO}_2$  son:

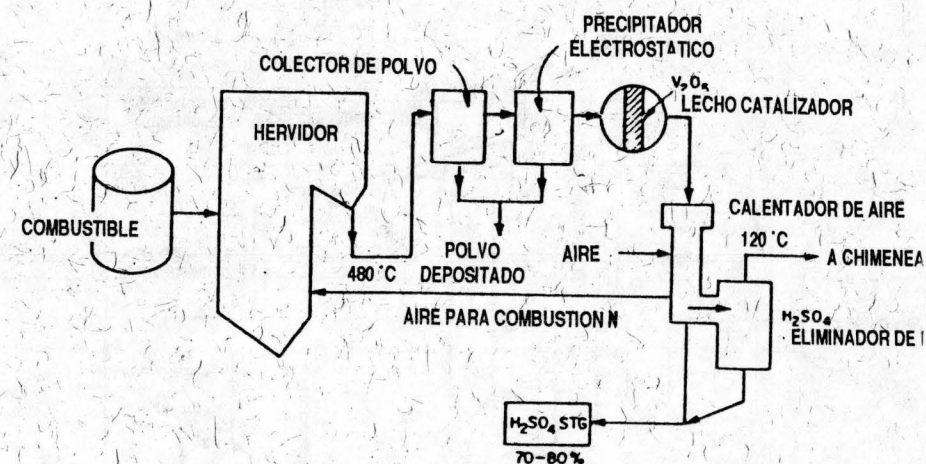
- El proceso de inyección de dolomita seca con lavado.
- El proceso de oxidación catalítica.
- El proceso con alúmina alcalinizada.
- La absorción seca o proceso de Reinluft.

El primer proceso utiliza dolomita seca y piedra caliza inyectada a un caldero, quemando un combustible fósil (ver Figura N° 11.9). La piedra caliza reacciona con el  $\text{SO}_2$  directamente en el caldero formando sulfato de calcio, el que es removido posteriormente por el lavado húmedo.



**Figura N° 11.9.**  
Fuente: Referencia N° 2.

El proceso de oxidación catalítica (ver Figura N° 11.10), desarrollado por la Monsanto Company, hace pasar los gases a través de un lecho catalizador de pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), después de haber experimentado una fase de remoción de partículas, produciendo solución de ácido sulfúrico, aproximadamente del 70 al 80% de concentración.



**Figura N° 11.10.**  
Fuente: Referencia N° 2.

El proceso de alúmina alcalinizada (ver Figura N° 11.11), hace pasar el gas a través de un lecho de este elemento (el cual es una forma activa de aluminato de sodio), constituido por esferas de un diámetro cercano a 1/16 de pulgada. El absorbedor es, en la práctica, un lecho fluidizado y la alúmina alcalinizada reacciona con el  $\text{SO}_2$  a una temperatura entre 300 y 350 °C. El  $\text{SO}_2$  es convertido en sulfato, el que es regenerado en el lecho fluidizado a una temperatura aproximada de 700 °C, utilizando un gas reductor obtenido por transformación de gas natural o un hidrocarburo apropiado. Se obtiene  $\text{H}_2\text{S}$  gaseoso, el cual es sometido en una planta al proceso Claus para convertirlo en azufre elemental.

Finalmente, el proceso Reinluft (ver Figura N° 11.12), se refiere a la absorción de  $\text{SO}_2$  por carbón de leña, formado por la calcinación de carbón a una temperatura de 600 °C. El absorbente puede ser reactivado, tratando el carbón con ácido sulfúrico y evaporando el ácido posteriormente. El  $\text{SO}_2$  recuperado puede ser utilizado en la fabricación de ácido sulfúrico o azufre.

### Oxidación con permanganato y cloro

Otro proceso que debe ser mencionado bajo el título de las técnicas de absorción, es el que usa permanganato de potasio para la oxidación de diferentes gases residuales. Este proceso implica una reacción química, pero emplea equipos convencionales de absorción o lavado de gas.

El permanganato de potasio es un agente oxidante fuerte. En una solución ácida fuerte, éste gana 5 electrones, libera 2,5 átomos de oxígeno y forma una sal de



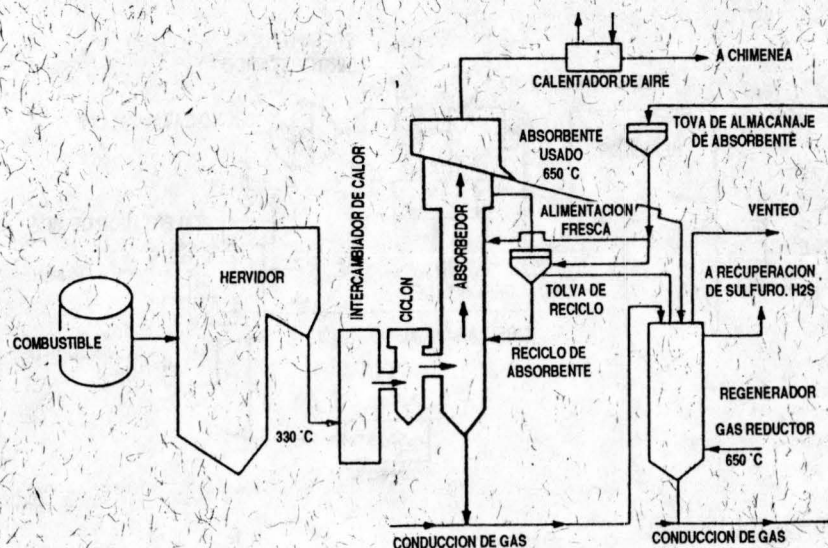


Figura N° 11.11.  
Fuente: Referencia N° 2.

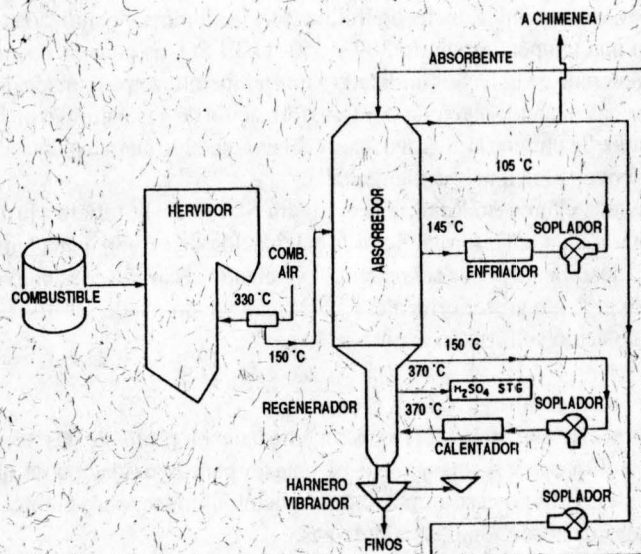


Figura N° 11.12.  
Fuente: Referencia N° 2.

manganeso soluble en agua. El permanganato ácido formado es, sin embargo, muy corrosivo y requiere de materiales de elevado precio en el diseño de los equipos. El método preferido para usar permanganato es disolverlo en una solución ligeramente alcalina, donde éste alcanzará sólo 3 electrones y generará 1,5 átomos de oxígeno. Se produce un precipitado insoluble de dióxido de manganeso, solución que no es corrosiva y es adecuada para usar en equipos de absorción de menores costos.

El oxígeno liberado desde la disolución de permanganato de potasio está disponible para la oxidación de materiales orgánicos en las corrientes de gas residual. Se le ha encontrado aplicación práctica en la remoción de una amplia variedad de olores nocivos, emitidos desde fuentes tales como plantas de asfalto y procesadoras de pescado. El permanganato es agregado al líquido de lavado (normalmente agua). Su grado de concentración es reconocido por el color. El permanganato de potasio presenta un color púrpura brillante. Cuando el oxígeno es consumido, el color desaparece gradualmente indicando la necesidad de más permanganato.

Este proceso no es utilizado en forma amplia por sus costos de operación. Sin embargo, puede ser más económico que otros métodos alternativos en el caso de gases con baja concentración de orgánicos, que tienen el característico olor pesado. Otra desventaja del permanganato es el precipitado de dióxido de manganeso. Este puede presentar problemas en la disposición final y, probablemente, requerirá de la adición de algún tipo de filtro al sistema.

El cloro y el dióxido de cloro, también pueden ser usados para la oxidación, tomando precauciones de un cuidadoso control para asegurar que el contenido de cloro en el gas de salida esté por debajo del mínimo permitido por las normas. El cloro, generalmente, es el menos costoso de los tres oxidantes.

### EQUIPOS DE ADSORCION

La adsorción es uno de los sistemas más recurridos para el control de vapores orgánicos. En el proceso de adsorción, los elementos orgánicos son recogidos selectivamente sobre la superficie de un sólido poroso. El carbón activado es sin duda el adsorbente utilizado con mayor frecuencia para los gases con bajas concentraciones de orgánico, por varias razones:

- Por su gran área superficial (1 gramo de carbón puede tener un área superficial de 500 m<sup>2</sup> y puede adsorber orgánico hasta la mitad de su peso).
- Por su bajo costo.
- Por su relativa insensibilidad al vapor de agua a humedades relativas bajo el 50%.

Otros adsorbentes de uso común son la sílica gel y la alúmina.

Para remover orgánicos desde corrientes gaseosas, pueden utilizarse dos tipos de sistemas de adsorción: los no regenerables (canastillos de carbón) y los regenerables (sistemas de lecho fijo).

Los sistemas de adsorción (ver Figura N° 11.13), consisten normalmente en uno o más recipientes de carbón activado que adsorben orgánicos en un período de

tiempo determinado, hasta que el carbón se satura. Una vez que el carbón está saturado es reemplazado por nuevo. El carbón saturado, generalmente, es descartado o retornado al abastecedor para su reactivación. En principio, tales sistemas no regenerables son simples y encuentran muchas aplicaciones en los casos donde el caudal es reducido (menos de  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y la concentración de orgánicos es baja. En presencia de altas concentraciones, la capacidad de los sistemas no regenerables puede no ser suficiente para permanecer operativos por un tiempo razonable.

El sistema regenerable de lecho fijo consiste en dos o más cámaras, cada una con adsorbente. En la Figura N° 11.14, se puede apreciar un diagrama general de flujo. Mientras una cámara esta operando, la otra está siendo regenerada, frecuentemente, con vapor a baja presión, aunque también puede utilizarse un gas inerte calentado.

La capacidad de adsorción del carbón se ve afectada por la concentración de orgánico en la corriente de gas. Es común que los fabricantes de carbón tengan antecedentes de equilibrio para compuestos específicos en relación a los diferentes tipos de carbón que ofrecen. Cuando disminuye la concentración de un constituyente orgánico en la corriente gaseosa, se hace más difícil adsorberlo sobre el carbón activado. Teóricamente, se puede producir carbón activado para remover contaminantes en muy bajas concentraciones. Sin embargo, un sistema de adsorción con carbón, diseñado para lograr un 95% de eficiencia para un orgánico dado, con presencia de 1000 ppm, puede no alcanzar al 95% de eficiencia frente al mismo constituyente en bajas concentraciones, por ejemplo 10 ppm.

Los equipos que utilizan carbón, entregan básicamente una concentración de salida constante. Previo a la saturación del carbón, la concentración de salida permanece generalmente constante durante un ciclo de adsorción, aunque la concentración de entrada pueda variar en más de un orden de magnitud. Las concentraciones de entrada están limitadas por la capacidad de adsorción del lecho de carbón o por problemas de seguridad. La máxima concentración de entrada es normalmente de alrededor de las 10.000 ppm. Con un sistema de esta naturaleza, es habitual lograr concentraciones de salida cercanas a las 50 ppm. Si se efectúan algunas modificaciones y combinaciones, pueden alcanzarse concentraciones tan bajas como 5 a 10 ppm. Para concentración de orgánicos sobre 100 ppm, los adsorbentes con carbón pueden lograr eficiencias de, al menos, un 95%. En muchas aplicaciones se han alcanzado niveles de control de 97 a 99%. Teóricamente, el carbón fresco activado debería eliminar casi todos los orgánicos de una corriente gaseosa con una concentración de 100 ppm o menos; sin embargo, los antecedentes experimentales, indican que, en un número significativo de casos, no se obtuvieron altas tasas de eficiencia. Las razones para estas bajas eficiencias no han sido establecidas con claridad, pero, entre otras, se incluyen las siguientes:

- Deficiencia física del carbón por repetidos ciclos de adsorción, regeneración, enfriamiento y secado.
- Reducción de la capacidad de adsorción del carbón debido a la formación de compuestos de alto peso molecular, que no son eliminados durante la regeneración.

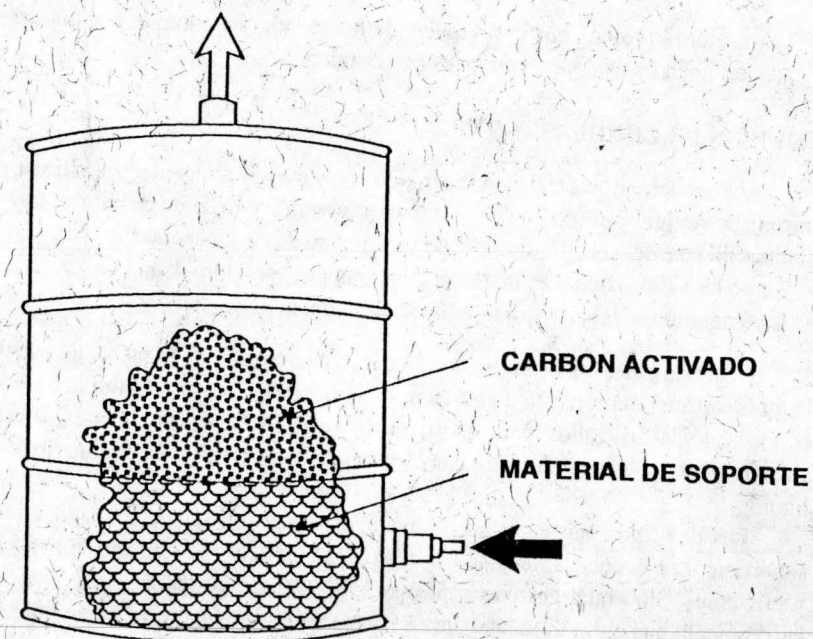


Figura N° 11.13.

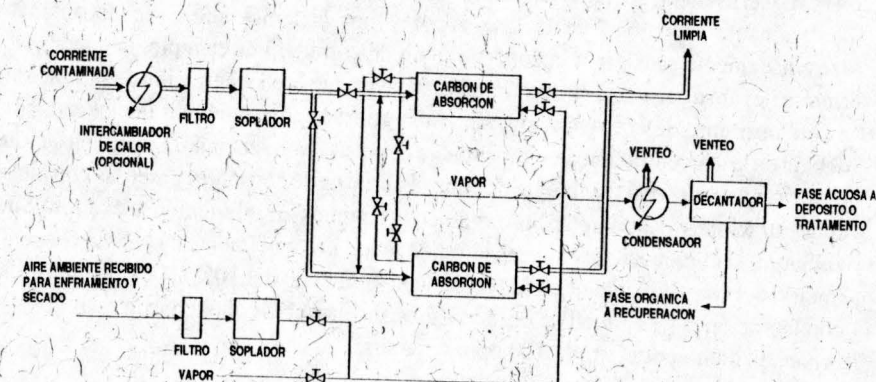


Figura N° 11.14.



- Limitaciones propias por la presencia de humedad, que compite por lugares de adsorción en bajas concentraciones de orgánico.

### EQUIPOS DE CONDENSACION

Los condensadores trabajan separando uno o más componentes volátiles de una mezcla de vapores por medio de la saturación, seguido ello de un cambio de fase. El cambio de fase de gas a líquido puede ser logrado de dos maneras:

- La presión del sistema es incrementada a una temperatura dada.
- La temperatura del sistema es reducida a presión constante.

Generalmente, los condensadores operan a la presión de la fuente de emisión, la que, normalmente, está cerrada a la atmósfera. Por este motivo, muchos condensadores utilizados para controlar la emisión de contaminantes, trabajan enfriando los vapores orgánicos hasta el punto de rocío, para luego eliminarlos como líquido.

Los dos tipos más comunes de condensadores son los de contacto y los de superficie. Los condensadores de contacto (ver Figura N° 11.15), son de bajo costo y eficientes. Sin embargo, puede presentar problemas la descarga del líquido de enfriamiento que entra directamente en contacto con los vapores. Por ejemplo, si el refrigerante es agua, enviada luego a tratamiento de aguas residuales, los volátiles pueden ser emitidos a la atmósfera durante el tratamiento, malogrando por tanto la efectividad del equipo de control. El condensador de tubo y carcasa (ver Figura N° 11.16), no permite el contacto entre los vapores y el líquido refrigerante. En este tipo de condensador, el líquido orgánico concentrado puede ser recuperado para reciclarlo o para otro tipo de uso.

La eficiencia de un condensador es determinada por la concentración del contaminante específico en la fase vapor y por la temperatura, siendo además extremadamente sensible a la concentración de entrada. Por ejemplo, la condensación se llevará a cabo si la concentración es mayor que la concentración de saturación a la temperatura de condensación; sin embargo, si la concentración inicial está por debajo de la concentración de saturación, la condensación será nula. La condensación puede ser una efectiva tecnología de control en casos de corrientes gaseosas con altas concentraciones de compuestos orgánicos y puntos de ebullición elevados. Sin embargo, la eficiencia del condensador tiende a caer rápidamente cuando la concentración del constituyente orgánico se reduce por debajo del 10% (100.000 ppm). La condensación no es efectiva en corrientes de gas con bajas concentraciones de orgánico, como por ejemplo 100 ppm o menos.

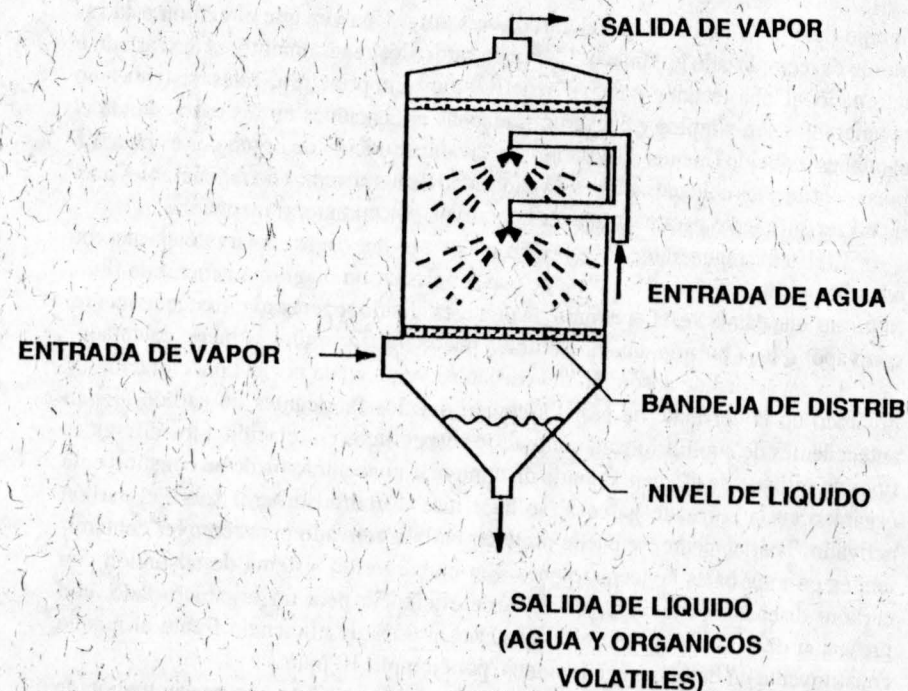


Figura N° 11.15.

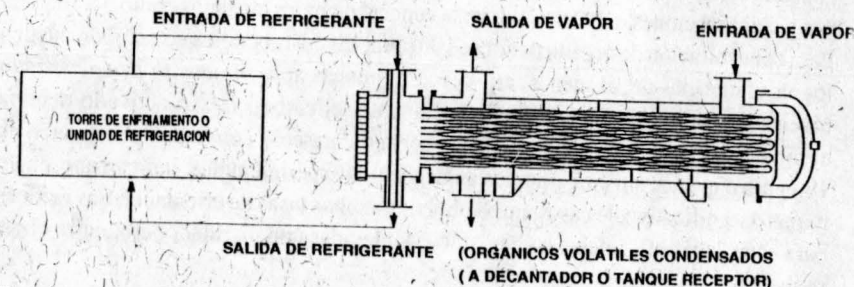


Figura N° 11.16.

## TECNOLOGIA PARA LA ELIMINACION DE PARTICULAS

La clasificación de los equipos de separación de partículas no es tarea sencilla, ya que como se ha indicado anteriormente, hay aparatos que utilizan más de un mecanismo. Una clasificación bastante amplia es la siguiente:

- Equipos de separación por gravedad.
- Equipos de separación por inercia o mecánicos.
- Equipos de separación por fuerza centrífuga.
- Equipos de separación por lavado.
- Equipos de separación por filtrado.
- Equipos de separación electrostática.

Aunque esta clasificación no se ajusta estrictamente a los diversos mecanismos de depuración, se utilizará, en lo sucesivo, en atención a sus numerosas ventajas didácticas.

### SEPARACION POR GRAVEDAD

En la Figura N° 11.17, se presenta una típica cámara de sedimentación por gravedad. Estos equipos consisten en una cámara de grandes dimensiones, en la cual, al entrar la corriente gaseosa, ésta pierde velocidad (alcanzando velocidades de sedimentación), lo que permite la sedimentación de las partículas de mayor tamaño. Las velocidades de sedimentación varían entre 18 y 180 mts/min. (60-600 pies/min.). Con el fin de reducir el recorrido de estas partículas, se suele colocar una serie de superficies a modo de bandejas que logran aumentar la eficacia de la separación, aunque dificultan la limpieza.

Las cámaras de sedimentación no son muy utilizadas debido a su baja eficacia y a la necesidad de grandes espacios, sin embargo, por su bajo costo y funcionamiento sencillo, pueden usarse como equipos de limpieza previa, montados en serie con aparatos de mayor rendimiento.

### SEPARACION POR INERCIA

Estos aparatos funcionan imprimiendo un cambio brusco a la dirección de la corriente gaseosa, lo que determina la separación de las partículas debido, principalmente, a su inercia, aunque también intervienen otros fenómenos asociados.

Los separadores tienen una estructura similar a la de la cámara de sedimentación, aunque con diversas modificaciones que mejoran su rendimiento.

Las cámaras de desviación obligan a que la corriente gaseosa efectúe un cambio de dirección para poder rodear un obstáculo situado estratégicamente (ver Figura N° 11.18). Como las partículas mayores tienden a conservar su dirección,

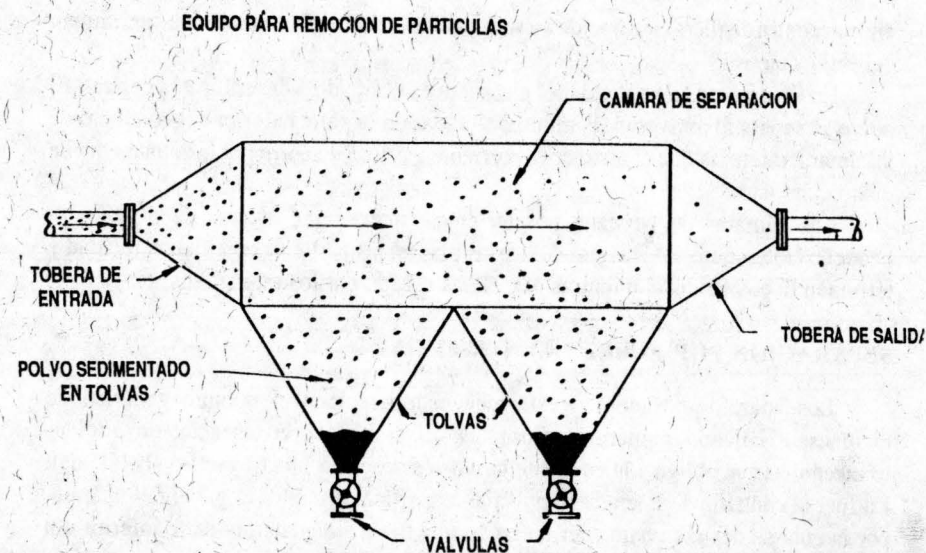


Figura N° 11.17.

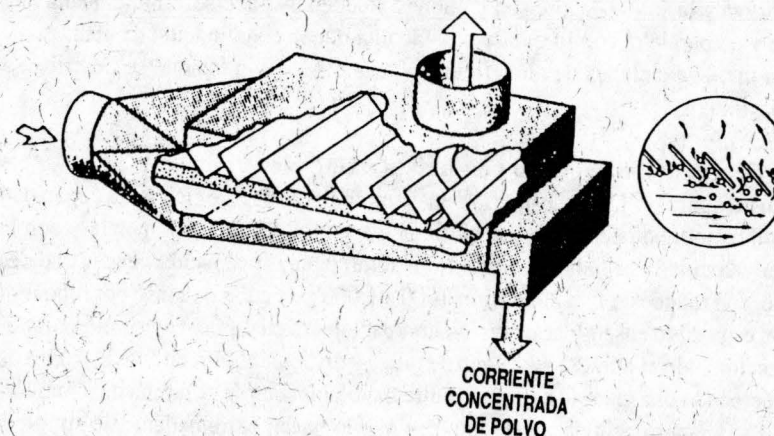


Figura N° 11.18.



chocan contra él, pierden velocidad y se depositan en una tolva, con lo que se eliminan del flujo gaseoso.

En las cámaras de película, el gas sucio es obligado a describir una espiral. El polvo se separa al atravesar las ranuras situadas en la parte exterior del conducto de la cámara, mientras que el resto de la corriente gaseosa discurre por la zona media de dicho conducto.

Las cámaras de persiana poseen en su interior un sistema de placas con pequeños intersticios. Al chocar contra las placas, las partículas pierden velocidad y terminan depositándose, mientras que el gas escapa por los intersticios.

### SEPARACION POR FUERZA CENTRIFUGA

Los aparatos basados en este mecanismo reciben el nombre genérico de ciclones, existiendo numerosas variantes. El ciclón es, en esencia, un artefacto mecánico que obliga a la corriente gaseosa a describir una trayectoria helicoidal. La fuerza centrífuga generada impulsa a las partículas contra la pared del aparato, por la cual se deslizan para caer luego en una tolva situada en la parte inferior del mismo, donde se recogen y separan de la corriente gaseosa, tal como se muestra en la Figura N° 11.19.

Estos aparatos pueden emplearse en paralelo, en un bloque único, mediante el empleo de modelos de tamaño muy reducido, que reciben el nombre de multiciclón. Cuando el número de ciclones en paralelo es elevado, la cámara para la entrada del aire, la tolva y la salida de aire son comunes. Pueden disponerse, simultáneamente, en serie y en paralelo, con lo que se obtiene una buena combinación de efectos. Los tres tipos de ciclones de alta eficiencia más usados son los que se describen a continuación.

#### Ciclón de diámetro pequeño con paleta axial

En la Figura N° 11.20, se muestra un ejemplo típico de este ciclón. La capacidad de los tubos individuales varía con el diámetro, con el diseño de la paleta y con la máxima velocidad aceptable del gas. Comercialmente, la capacidad encontrada es variable, con rangos de 15 a 30 m<sup>3</sup>/min. (500 a 1.000 pies cúbicos/min.) por tubo. Por lo tanto, es posible ensamblar un ciclón compacto para cualquier capacidad requerida, seleccionando el número adecuado de tubos y disponiéndolos en fila. Este tipo de ciclón demanda una energía que varía entre 4 a 6 pulgadas de columna de agua. Sus ventajas son la ausencia de partes móviles que lo hacen extremadamente simple y confiable; la alta capacidad, lo compacto de su estructura y los costos reducidos por usar tubos estandarizados, hacen de éste el más económico de los ciclones de alta eficiencia y, como tal, el más económico de todos los colectores de partículas. Su desventaja es que las paletas obstruidas están sujetas a erosión, lo que puede ser crítico al usar polvos gruesos de características abrasivas, incluyendo alta granulometría y peso específico. El tamaño pequeño de las aberturas entre las paletas es

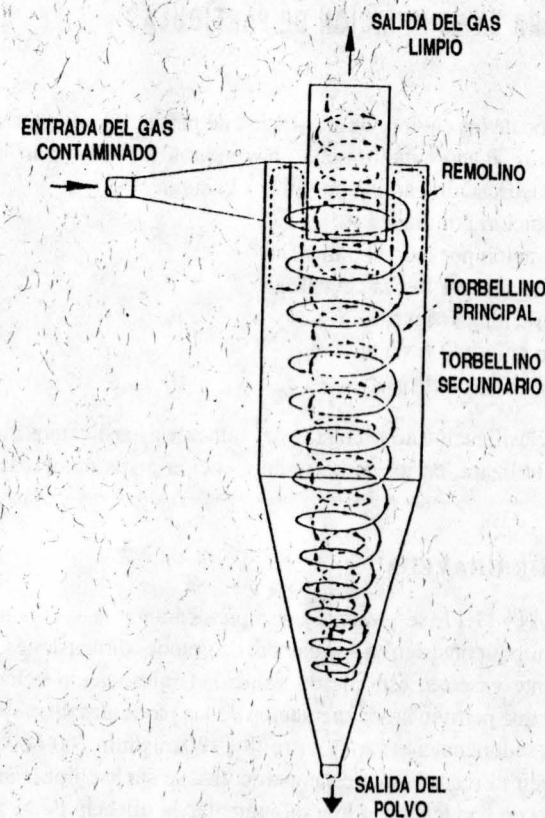


Figura N° 11.19.

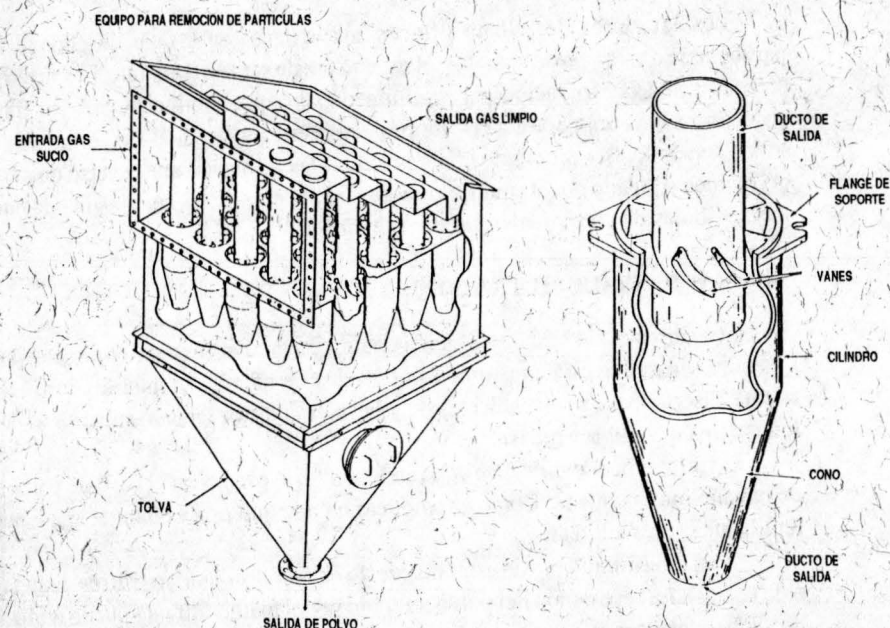


Figura N° 11.20.

propenso a taponarse con polvos que tienen tendencia a adherirse o pegarse cuando están secos o en presencia de humedad.

#### Ciclón de diámetro grande con involuta de entrada

La Figura N° 11.21, muestra un colector típico compuesto de cuatro ciclones dispuestos en paralelo, por lo que cada ciclón manipula el 25% del total de flujo de gas. La bôquilla de entrada, con forma de involuta rectangular, presenta la pared derecha tangente al cilindro. Con este diseño, el vértice descendente se forma con un mínimo de turbulencia, facilitando por lo tanto la precipitación del polvo hacia las paredes del cilindro y del cono, bajo la influencia de la fuerza centrífuga. Los requerimientos de energía para este tipo de ciclón están en el rango de 4 a 6 pulgadas de columna de agua.

La ventaja de este colector es la ausencia de partes móviles, que lo hacen simple y confiable. Además, el hecho de no tener paletas, elimina el riesgo de erosión y taponamiento. Su desventaja principal es que el costo y tamaño de este ciclón aumenta cuando los requerimientos de eficiencia son mayores. Este aspecto económico hace preferible el ciclón de paleta axial, pues sus características operativas pueden satisfacer todos los requerimientos.

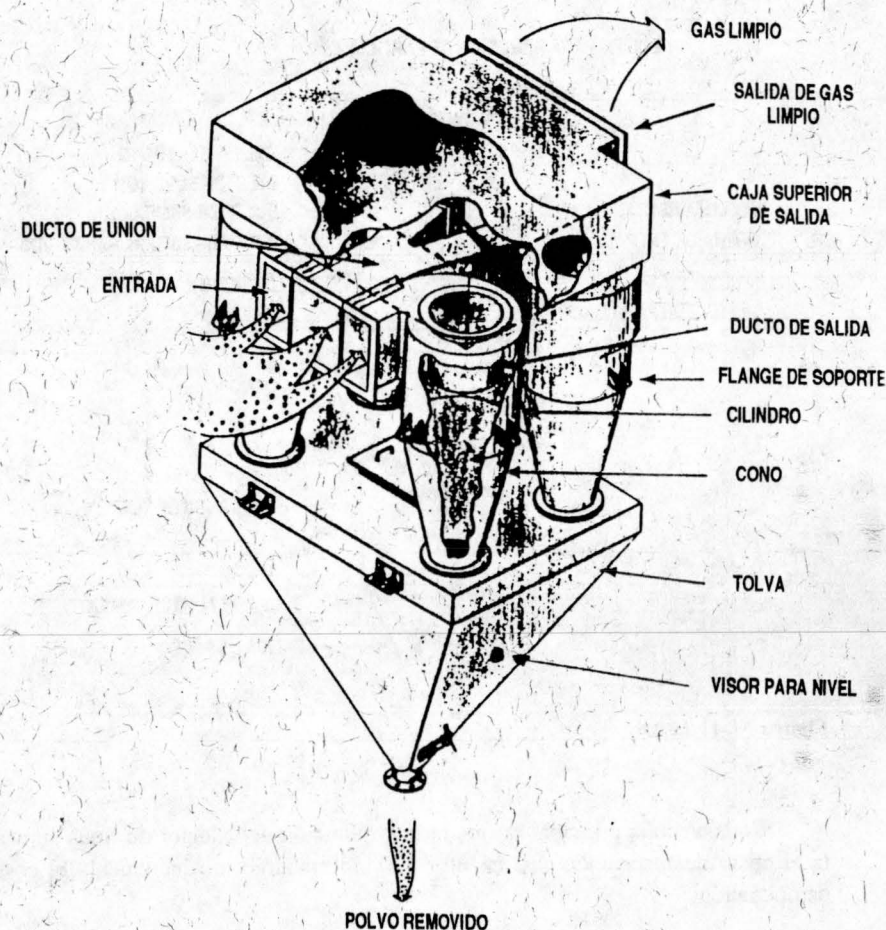


Figura N° 11.21.

#### Ciclón de gran diámetro con involuta de entrada y eductor fino

La Figura N° 11.22, presenta este tipo de ciclón. El modelo de flujo es similar al ciclón con entrada de tipo involuta, excepto que un fino eductor está agregado al tope del cilindro, de manera de eliminar continuamente las partículas de polvo fino que tienden a ser atrapadas por el molino superior. Estos polvos finos son eliminados desde el cilindro y transportados mediante un ducto en espiral a un inyector de finos, donde son combinados con las partículas gruesas al nivel donde se encuentran el cilindro y el cono. Como ventajas, este ciclón tiene las mismas que aquellas descritas para el ciclón con entrada involuta, más el aumento en la eficiencia de recolección.



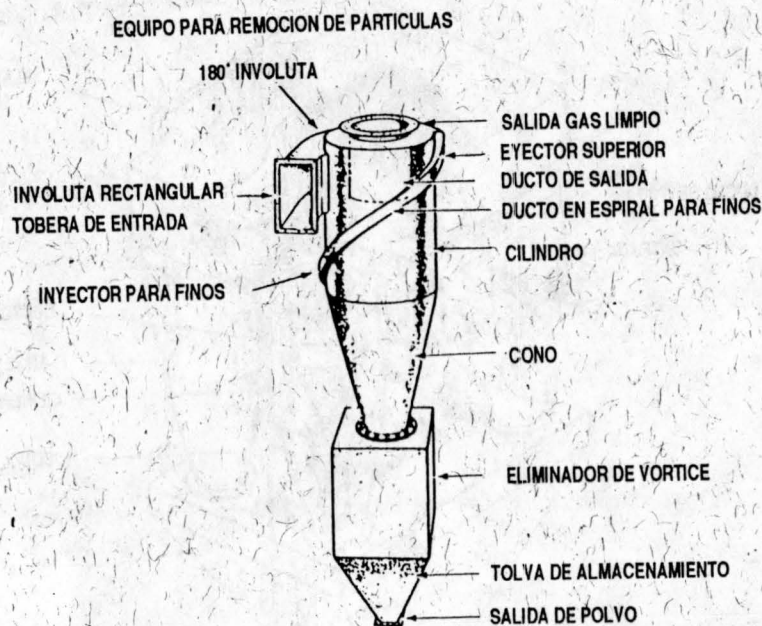


Figura N° 11.22.

Su desventaja principal es que la incorporación del educor de finos aumenta el costo de instalación casi en un 10%, sin embargo, no incrementa el costo de operación.

### SEPARACION POR LAVADO

Estos equipos se basan en un mecanismo de impacto directo, donde el medio separador está constituido por gotas de líquido cuya función es solamente mecánica. La colisión de las partículas con el medio líquido puede efectuarse de diversos modos. Uno de los más extendidos es el de tipo Venturi. La corriente gaseosa atraviesa una garganta de sección mínima donde se le somete a una lluvia finamente pulverizada de progresión horizontal.

En los lavadores de aspersión las partículas se someten a la pulverización líquida, en contracorriente con el gas, separándose así de la corriente gaseosa.

En los lavadores de placas o choque, las partículas de polvo, después de recibir la lluvia de líquido, colisionan contra placas deflectoras y se recogen en álabes separadores.

Los lavadores de relleno ofrecen una extensa superficie de choque a partículas. En este tipo de aparatos, el relleno puede ser fijo o flotante. Los rasgos caracterizan a la separación por vía húmeda son, que el efluente gaseoso fina encuentra a baja temperatura con motivo del fuerte enfriamiento experimentado sólido separado está mezclado con gotas líquidas formando una especie de papel el volumen ocupado por el equipo no suele ser muy grande; las necesidades de líquido y las pérdidas de carga suelen ser considerables.

### SEPARACION POR FILTRADO

Los filtros están basados también en un mecanismo de impacto directo, donde el medio separador está constituido por tejidos de naturaleza muy diversa. La corriente gaseosa pasa a través del tejido y las partículas de tamaño superior al de intersticios quedan retenidas.

El filtrado puede utilizarse con rendimientos elevados en el caso de partículas de tamaño muy pequeño. Como el producto recuperado está exento de agua, puede reutilizarse con facilidad.

El medio filtrante puede estar dispuesto en forma cilíndrica (filtros de mangas o de bolsas). La separación del polvo retenido por el medio filtrante puede realizarse de varias maneras:

- Sacudida mecánica. Los filtros se limpian por sacudida de las mangas, con lo que el polvo depositado cae sobre las tolvas.
- Flujo inverso. La limpieza se efectúa haciendo circular aire limpio en sentido opuesto al normal de la corriente gaseosa.
- Ondas sonoras. La producción de sonidos de baja frecuencia origina una vibración capaz de desprender el polvo del tejido filtrante.

De la gran variedad de filtros existentes, los siguientes son los que tienen aplicación comercial más amplia.

#### Filtro de manga intermitente con agitación manual

Este es el más antiguo y simple de todos los filtros de tela, con capacidad para tratar varias decenas de mts/min. Como puede verse en la Figura N° 11.23, este filtro consiste en una cubierta dividida en una sección superior y otra inferior por medio de un disco. La porción superior contiene el filtro de tela que puede tomar la forma de uno o más tubos, o variadas otras formas, todas diseñadas para lograr la superficie filtrante suficiente dentro del espacio disponible. La porción inferior puede estar formada por una o más tolvas piramidales. Mientras que en la figura se muestra una sola manga, el filtro puede constar de varias para proveer la capacidad necesaria. Durante la operación, el gas sucio entra por debajo de la manga y por sobre la tolva. Como la velocidad del gas se reduce a la entrada, las partículas gruesas sedimentan directamente en la tolva, mientras que las partículas finas y el gas pasan hacia el filtro.

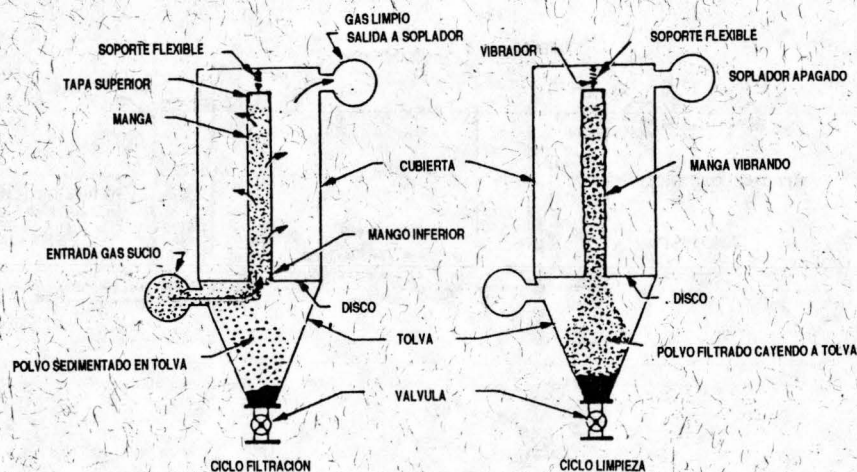


Figura N° 11.23.

manga. El gas pasa a través de la tela y el polvo queda atrapado. El gas limpio es descargado por un ducto que lo conduce al ventilador. Debido a que el polvo atrapado incrementa el espesor de la torta filtrante sobre las paredes interiores de las mangas tubulares, la caída de presión irá en aumento. Periódicamente, el filtro debe ser puesto fuera de servicio para limpiar las mangas.

Durante el ciclo de limpieza y, como el extremo superior de las mangas está sujeto a un punto flexible, éstas pueden ser agitadas mecánicamente. La agitación debe ser vigorosa a fin de soltar gran parte del polvo filtrado depositado sobre la superficie interior de la manga, con lo cual éste caerá a la tolva. Es importante que sobre la tela filtrante permanezca una cierta capa del polvo filtrado a fin de no reducir demasiado la eficiencia de recolección.

#### Filtro de manga convencional con agitación mecánica automática

Este también es uno de los filtros de tela más antiguos y más usados. Como puede verse de la Figura N° 11.24, consiste en una cubierta dividida en una sección superior e inferior por medio de un disco. La porción superior contiene la tela filtrante y la porción inferior consiste en una tolva piramidal, cada una con su propia válvula. En la figura se muestra una sola manga, sin embargo, cada compartimiento, normalmente, contiene varias. Cada una de las mangas está estirada entre una tapa flexible y un mango inferior fijo sobre el disco. Para facilitar la instalación y sustitución, las mangas van abrochadas a las tapas y mangos por medio de cierres o abrazaderas circulares.

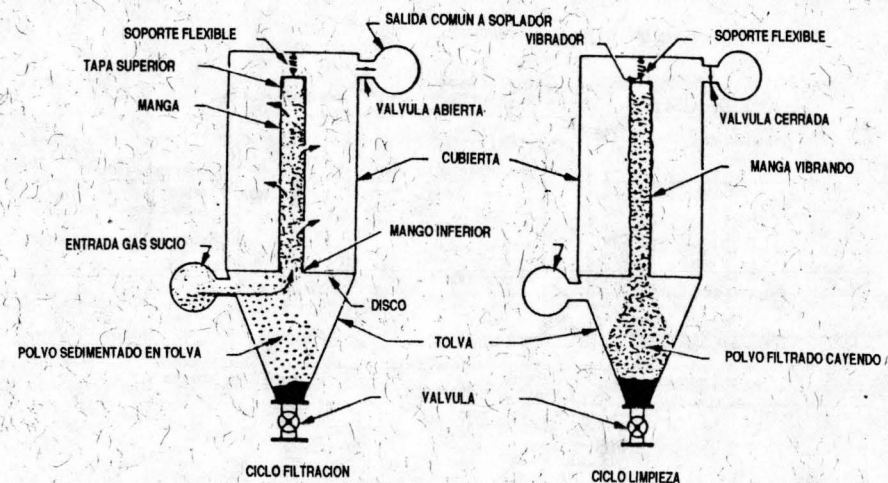


Figura N° 11.24.

El modo de operación de este filtro es similar al anterior, diferenciándose únicamente en el ciclo de limpieza. Durante este último, se cierra la válvula de salida que normalmente está abierta. Los extremos superiores de las mangas, montado flexiblemente, a menudo en soportes comunes, son en este caso agitados por medio mecánicos o neumáticos. En algunos ciclos de limpieza, se sopla sobre la cubierta una pequeña cantidad de aire secundario para facilitar la limpieza de las mangas y aumentar la velocidad de caída del polvo. Al término del ciclo de limpieza, se abre la válvula de salida, retornando el compartimiento al ciclo de filtrado. Por lo tanto los compartimientos individuales se limpian uno a la vez, con el fin de mantener cercana a un valor nominal la caída de presión en el colector.

#### Filtro de limpieza automática mediante flujo de aire inverso

Los componentes de este tipo de filtro se muestran en la Figura N° 11.25. La cubierta está dividida en dos partes por medio de un disco. La porción superior contiene la manga filtrante y la porción inferior contiene la tolva. Cada manga tubular está abrochada a un mango en su extremo inferior y a una tapa flexible en su extremo superior.

Durante el ciclo de filtrado, el flujo de gas se alimenta por la entrada común hacia cada una de las tolvas, ascendiendo por las mangas, atravesando la tela desde el interior hacia afuera y, luego escapando por la salida común. Las tolvas sirven de cámaras de sedimentación para el polvo grueso.

Durante el ciclo de limpieza, se cierra la válvula de salida que normalmente está abierta. Al mismo tiempo, se abre una pequeña válvula, permitiendo que el aire



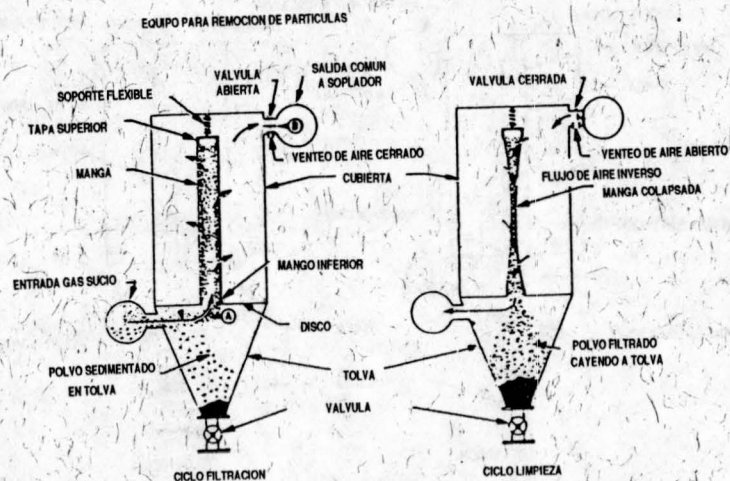


Figura N° 11.25.

atmosférico embista la cubierta y colapse las mangas. Esto resquebraja la torta de material retenido, provocando su caída a la tolva. Al término del ciclo de limpieza, se abre la válvula de salida y se cierra la de entrada de aire. Los compartimientos individuales se limpian uno a la vez, de modo predeterminado, activado por un programá o mediante el monitoreo de la caída de presión.

#### Filtro de limpieza por anillos de aire comprimido

Como se muestra en la Figura N° 11.26, este filtro consiste en una cubierta dividida en tres partes por medio de un disco superior y otro inferior. El espacio sobre el disco superior sirve de entrada común a varios compartimientos. La porción central la configuran las mangas filtrantes y la porción inferior consiste en tolvas piramidales individuales. Las mangas filtrantes están estiradas y abrochadas a mangos sobre los discos superior e inferior.

El gas sucio entra al espacio ubicado sobre el disco superior, bajando por el interior de las mangas y atravesando la pared filtrante. El polvo se deposita en las paredes interiores de la manga. Cada una de las mangas se limpia por medio de un anillo de aire comprimido, cuyo diámetro interior es ligeramente más pequeño que el diámetro exterior de la manga. Estos anillos suben y bajan, alternativamente, en grupos, sobre toda la longitud de la manga. Hay una ranura anular en el anillo a lo largo de su diámetro interno, el que dirige el aire comprimido a través de la tela. La velocidad es suficiente para limpiar la manga del material retenido. El aire comprimido llega a los anillos a través de tubos flexibles. Debe destacarse que el mecanismo que

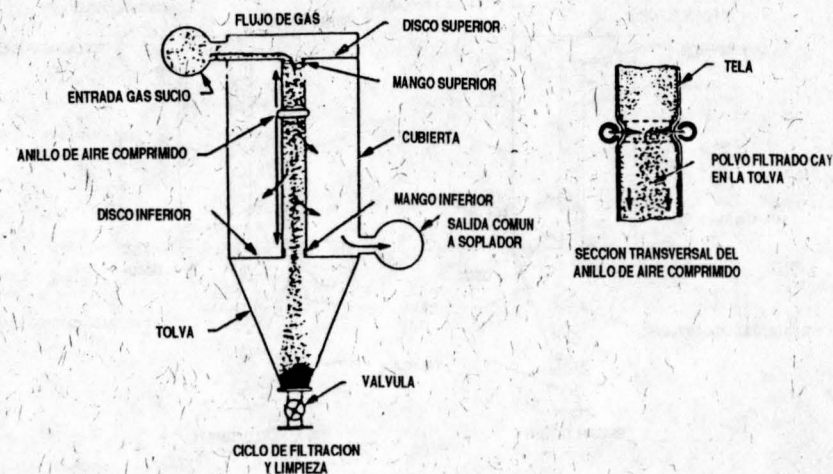


Figura N° 11.26.

sube y baja los grupos de anillos opera sobre el lado limpio del filtro manga, y que los ciclos de filtrado y limpieza se llevan a cabo simultáneamente. En este tipo de filtro, la compartimentación no es necesaria, pues todos los tubos operan continuamente.

#### Filtro de limpieza automática mediante impulsos de aire comprimido

En este tipo de filtro, la cubierta está dividida en una porción superior y otra inferior, como se muestra en la Figura N° 11.27. La pequeña porción superior sirve de descarga común para el gas limpio. Por cada una de las mangas filtrantes existe un mango con forma de Venturi. Montado sobre cada una de las mangas se encuentra un inyector de aire comprimido. El medio filtrante está montado sobre un marco interno con un fondo cerrado. La porción inferior de la cubierta se abre a una tolva piramidal.

El gas se introduce por la parte inferior de la cubierta, justo sobre la tolva. Este sirve de cámara de sedimentación para el polvo grueso, sin necesidad de filtración. El flujo de gas se dirige luego hacia arriba, alrededor de las mangas filtrantes y entonces, atraviesa los filtros desde el lado exterior. Es de destacar que, en este caso, el material queda retenido en la pared exterior de las mangas.

Durante el ciclo de limpieza, periódicamente, se activan pulsos de aire comprimido a las mangas individuales a través del Venturi. La fuerza de los pulsos de aire golpea la manga soltando el material retenido. El ciclo de limpieza normalmente actúa sobre varias mangas a la vez. La frecuencia de la limpieza está limitada sólo por consideraciones de vida útil del filtro manga.

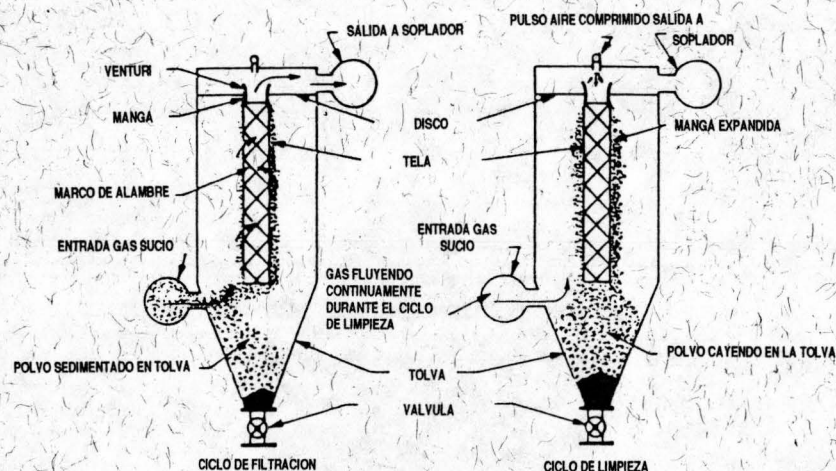


Figura N° 11.27.

### SEPARACION POR FUERZAS ELECTROSTATICAS

Los depuradores basados en fuerzas electrostáticas son útiles en aquellos casos en que el tamaño de las partículas es muy pequeño y donde se necesitan rendimientos elevados de depuración.

De acuerdo con el sistema de eliminación de las partículas recolectadas, estos aparatos suelen clasificarse en depuradores secos y húmedos. En los primeros, las partículas se separan de los electrodos, al golpear éstos con martillos o vibradores. En los segundos, las placas colectoras se riegan de tal forma que el líquido arrastra a los contaminantes depositados.

La pérdida de carga en este tipo de depuradores es inferior a la registrada en otros análogos para el mismo rendimiento operativo. Como contrapartida, hay que señalar que la inversión que requieren es muy elevada y su mantenimiento es complejo.

### CONCLUSIONES

De lo anteriormente expuesto se puede inferir que la reducción de la contaminación atmosférica consiste básicamente en reducir la emisión de material particulado y de aquellos compuestos gaseosos tóxicos.

La disminución de la emisión de material particulado se logra empleando cuatro tipos de equipos diferentes, que colocados en orden de costo creciente son:

- Ciclones
- Lavadores
- Filtros de tela
- Precipitadores electrostáticos

En los casos anteriores, la elección del equipo adecuado dependerá de la concentración, distribución del tamaño de partículas, temperatura de trabajo y grado de eficiencia requerido. El costo del equipo aumenta cuando la fineza del material particulado a remover es mayor.

En el caso de la reducción de contaminantes gaseosos se utilizan fundamentalmente las siguientes técnicas:

- Combustión
- Absorción
- Adsorción
- Condensación

La combustión es una técnica de destrucción del contaminante, el que debe ser posible de oxidar. Con frecuencia hay gases de combustión (humos) que contienen concentraciones importantes de monóxido de carbono que debe ser quemado a dióxido de carbono antes de ser lanzado a la atmósfera. Las otras técnicas tienen el beneficio de poder recuperar el contaminante.

Cuanto menor es la concentración de un contaminante gaseoso, tanto mayor será el costo de su reducción.

### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Dé Lora S., Federico y Miró Ch., Juan; "Técnicas de Defensa del Medio Ambiente"; Editores Labor S.A.; capítulos 13 y 14; 1978.
- Ross, Richard D.; "Air Pollution and Industry"; Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series; capítulos 8 y 9.
- Zerbonia, R.A. y otros; "Control Technologies for Low Organics Concentration Gas Stream"; Research Triangle Institute for International Workshop Alternative Solutions to the Pollution Problems of Santiago, Chile; 1992.





**CAPITULO 12**  
**POLITICAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACION ATMOSFERICA:**  
**ASPECTOS CONCEPTUALES Y EMPIRICOS**

*Raúl O'Ryan G.*

*Políticas para reducir la contaminación atmosférica:*  
*aspectos conceptuales y empíricos 379*

*Justificación para la intervención del Estado 380*

*Clasificación de políticas disponibles 382*

*Políticas para el control de la contaminación atmosférica:*  
*patrones observados 395*

*Conclusiones: patrones observados en el diseño*  
*y desempeño de políticas 401*

*\*Política ambiental para Santiago:*  
*contexto y criterios 403*

*Referencias bibliográficas 405*

## POLITICAS PARA REDUCIR LA CONTAMINACION ATMOSFERICA: ASPECTOS CONCEPTUALES Y EMPIRICOS

En la primera parte de este capítulo se discutirá la necesidad de intervención estatal en la superación y control de los problemas de contaminación en las grandes urbes. Posteriormente se detallan las políticas disponibles para reducir la contaminación, estableciendo sus ventajas y desventajas. La tercera parte presenta los patrones observados en la aplicación de políticas en diversos países del mundo. Para finalmente discutir la importancia del contexto y los criterios que deben tomarse en cuenta para elegir las políticas a aplicar.

El ente regulador a cargo de mejorar la calidad del aire de una gran urbe tiene a su disposición una variedad de políticas. Estas pueden ser muy restrictivas, por ejemplo la prohibición de usar cierta tecnología; o muy flexibles, como es el caso del uso de permisos transables. Uno de los primeros problemas que debe enfrentar el ente regulador es la elección de un conjunto de políticas apropiadas para lograr las metas que se establezcan como deseables. Pero, ¿qué se entiende por una política "apropiada"? En algunos casos se puede tener como prioridad que la política sea efectiva, es decir que se logre con certeza la meta establecida. O puede buscarse que sea la de mínimo costo, o la de menor impacto negativo sobre los más pobres. Puede desearse que sea políticamente factible, o que permita al Estado generar recursos. Es muy improbable que una única política permita el logro simultáneo de todos estos objetivos.

Lamentablemente, existe escasa experiencia en los países en vías de desarrollo en la aplicación y posterior evaluación de políticas para reducir la contaminación atmosférica (Eskeland y Jiménez 1992; Krupnick 1991). Como resultado, el ente regulador se encuentra huérfano de antecedentes para tomar una decisión informada. Por ello en este capítulo se presenta una discusión sobre las políticas disponibles y antecedentes empíricos sobre su desempeño, basada en la experiencia de casi dos

■ **Raúl O'Ryan Gallardo**  
Ingeniero Civil Eléctrico,  
Universidad de Chile.  
Ph.D en Economía, Universidad  
de California, Berkeley, 1993.  
Trabajos en el área de Microeconomía,  
Economía de Medio Ambiente,  
Economía de Recursos Naturales,  
Desarrollo Económico.  
Investigación en Políticas  
para la regulación ambiental;  
Gestión ambiental y de recursos  
naturales en países en desarrollo.



decenios en diversos países del mundo. Si bien estas experiencias son en su mayoría de países desarrollados, muchas de las conclusiones son de aplicabilidad general y, por lo tanto, relevantes para el tomador de decisiones en el caso de países en desarrollo, o en el caso de Santiago de Chile.

## JUSTIFICACION PARA LA INTERVENCION DEL ESTADO

En una economía de mercado, las decisiones de producción y consumo son esencialmente individuales. Al decidir su nivel de producción, cada empresario busca maximizar los beneficios que obtendrá de su actividad. Para ello, considera los costos directos de producción en los cuales debe incurrir y los ingresos que obtendrá como resultado. Cada empresario de la locomoción colectiva actúa de manera similar: busca el máximo beneficio de operación de sus vehículos y, para ello, pesa los costos de operación diarios con los ingresos obtenidos por el total de boletos cortados en el día. Cada dueño de automóvil, por otra parte, decide si el costo de usar su vehículo, en términos de tiempo de viaje y comodidad, es mayor o menor al beneficio de usar el transporte colectivo. Al calefaccionar y cocinar, cada consumidor se ve enfrentado a la decisión de qué y cuánto combustible utilizar. Para ello pesa las alternativas a su alcance y elige la que le produce una mayor satisfacción por el mismo desembolso.

Cada una de estas decisiones individuales puede tener un impacto negativo sobre la calidad del aire de la ciudad: los procesos productivos, la circulación de cientos de miles de vehículos y el uso de artefactos en cada hogar, generan emisiones contaminantes. Estas emisiones afectan la salud y bienestar general de la población expuesta, empeorando su calidad de vida. En muchos casos, se obliga a cuantiosas inversiones para mitigar sus efectos. Sin embargo, a falta de algún tipo de intervención externa, no existe obligación de incorporar —o internalizar— al proceso de toma de decisión los costos que se imponen a los demás. Esto es lo que los economistas denominan una externalidad negativa.

Desafortunadamente, es muy improbable que quienes generan la contaminación, incorporen voluntariamente estos costos ambientales a su proceso de toma de decisiones. ¿Qué incentivo tiene un empresario para reducir su producción o incorporar tecnologías menos contaminantes que le resultan más caras? De hacerlo, perdería competitividad frente a otro que no lo hace. ¿Qué beneficio obtendría un empresario de transporte al reducir la circulación de su vehículo? De hacerlo, perdería pasajeros que serían una ganancia neta para otro que no reduce su circulación. ¿Por qué un usuario de automóvil va a dejar de usar su vehículo, si viajar en transporte colectivo es lento e incómodo? En resumen, dejado a su arbitrio, el mercado llevará a niveles de contaminación que pueden llegar a ser intolerables.

Esto no necesariamente justifica la intervención del Estado, obligando a internalizar los costos sociales. De acuerdo al Premio Nobel de Economía 1991, Ronald Coase, la explicación de por qué la externalidad no se corrige reside en la indefinición del derecho de propiedad sobre el recurso escaso afectado. Al igual que cualquier otro bien escaso, si se define su propietario, entonces éste le dará el uso que más le convenga (Coase 1960). Hoy en día, quienes lo contaminan, usan del recurso escaso "aire limpio", es decir, por omisión, están haciendo uso del derecho. ¿Qué pasaría si los derechos de propiedad se asignan explícitamente a los afectados por la contaminación? Entonces, para contaminar sería necesario compensar a los afectados por el impacto negativo que sufrirían. Esta compensación puede ser, por ejemplo, una retribución monetaria directa. Esto llevará a un proceso de negociación entre las partes donde el afectado pesará el incentivo monetario ofrecido por los que contaminan y el impacto de la contaminación sobre su salud, entorno natural, etc. Así, al definirse el derecho con claridad se resuelve el conflicto planteado.

Bajo los supuestos de perfecta información de parte del afectado y negociación sin costo entre las partes, se puede lograr la internalización de la externalidad sin más participación del Estado que la de obligar a que se respeten los derechos de propiedad. Para que este proceso resulte, es fundamental que tanto los emisores como las víctimas sean claramente identificables. Estas condiciones no se dan en el caso de las grandes urbes. ¿Cómo definir de quién (o de quiénes) es la responsabilidad por el daño infligido a un actor particular? ¿Cómo se cuantifica este daño? ¿Cómo y quién lo valora? Además, los costos de negociación crecen explosivamente junto con el número de fuentes contaminantes y víctimas. ¿Cómo se pueden compatibilizar las necesidades de empleo y servicios de los millones de personas que viven en la ciudad, actividades ambas que generan contaminación, con los deseos de vivir en un ambiente puro? ¿Cómo se resuelve el conflicto si los diferentes grupos tienen distintas respuestas a la pregunta anterior? Por ejemplo, por muy orientado que esté un empresario o el Estado a la protección del ambiente, rara vez aceptará el nivel de cero contaminación como una meta razonable. En Santiago hay cinco millones de afectados, mil quinientas fuentes fijas puntuales de emisión, cerca de quinientos mil automóviles y diez mil buses. No se puede pensar de manera razonable que entre estos agentes se lleve adelante un proceso de negociación sin la activa participación del Estado. De esta forma, la existencia de costos sociales no internalizados por cada agente individual, en conjunto con las dificultades asociadas a un gran número de agentes contaminantes y víctimas, son un argumento de peso para crear instituciones responsables de la calidad del aire.



## CLASIFICACION DE POLÍTICAS DISPONIBLES

En el punto anterior se argumentó sobre la necesidad de que el Estado intervenga, de modo de lograr una calidad de aire aceptable en la ciudad. Una pregunta fundamental es ¿qué formas puede tomar esta intervención, es decir, de qué instrumentos dispone el Estado para promover el logro de las metas propuestas? Como se verá, el ente regulador dispone de una amplia gama de alternativas entre las cuales elegir. Estas pueden clasificarse como políticas de regulación directa, de incentivo económico, de gasto directo del Estado y de persuasión. Si bien en muchos casos es difícil establecer con precisión a qué grupo pertenece un determinado instrumento, esta distinción es útil y es posible establecer las características específicas de cada política. (Ver Bernstein 1991 y OCDE 1989)

La **regulación directa**, comprende medidas orientadas a influir directamente en el desempeño ambiental de los agentes contaminantes. Estas incluyen normas que regulan los procesos permitidos, prohíben o limitan ciertas emisiones, o restringen ciertas actividades a determinados horarios o zonas, por medio del uso de licencias, estándares de emisión, zonificación, etc. Su característica principal es que limitan la discreción del que contamina respecto de las medidas de control que puede tomar. El agente que contamina debe cumplir las limitaciones o enfrentar las sanciones judiciales o administrativas correspondientes. Por lo general, sus costos e impacto ambiental son cuantificables de manera directa y el cumplimiento de la normativa es de fácil fiscalización.

Las medidas de **incentivo económico**, en cambio, afectan los costos y beneficios del agente que contamina. Influyen de esta forma en su proceso de toma de decisiones y comportamiento, de modo que el agente asuma un curso de acción menos contaminante. A diferencia de la regulación directa, los instrumentos de incentivo económico dejan libertad a los agentes para responder a ellos de la manera que estimen más apropiada. Algunos instrumentos típicos, en este caso, son el uso de impuestos y los permisos transables. A este tipo corresponden también las políticas sectoriales, tales como el aumento de los precios de ciertos insumos energéticos contaminantes. Estas políticas pueden clasificarse como indirectas. No están orientadas directamente al daño producido por la contaminación, sino que la afectan de manera indirecta controlando variables relacionadas con ella, tales como el uso de ciertos insumos y productos (Eskeland y Jiménez 1992). Las políticas de incentivo económico, tienen resultados más inciertos en cuanto a la calidad ambiental que se logra, que las de regulación directa, pues dependen de la respuesta de los agentes a los estímulos económicos. Además, su fiscalización puede complicarse al aumentar el tipo de alternativas autorizadas.

Una tercera forma de intervención es la de que el Estado realice gastos e inversiones orientados a reducir la contaminación. La pavimentación y limpieza de

calles y la construcción de sistemas de Metro, son ejemplos típicos de estas medidas. También lo es la inversión estatal en el desarrollo de tecnologías limpias. Los principios que regulan la toma de decisiones en este caso, provienen de la literatura especializada en costo-beneficio: el Estado realiza aquellas inversiones que generan el mayor beneficio social por peso invertido. Por ello, los fondos requeridos para inversiones en descontaminación compiten con otros usos prioritarios para el Estado. por ejemplo, la construcción de carreteras, hospitales, escuelas, etc.

Finalmente, la **persuasión** es un instrumento que se utiliza en conjunto con la regulación directa y las medidas de incentivo económico. Este instrumento busca internalizar la conciencia ambiental en el proceso de toma de decisiones individual. por medio de la aplicación directa o indirecta de presiones. Un ejemplo de este tipo de medidas son las negociaciones entre el ente regulador y la industria orientadas a reducciones "voluntarias". Si bien no es un instrumento de incentivo económico, un elemento importante en la persuasión puede ser la amenaza de aplicar alguna sanción económica si no se llega a acuerdo. Los procesos de negociación entre el ente regulador y los afectados, han sido relevantes en diversos países para precisar el contenido de las políticas de regulación directa. Las ventajas de este tipo de proceso son, el aumento de la probabilidad de que los afectados acepten la normativa impuesta y la cumplan; permite cierta flexibilidad, lo que mejora el desempeño de la normativa; y se reducen las incertidumbres respecto de su aplicación, tanto para el regulador como para los afectados (OCDE 1989, p. 28-29).

Este capítulo se concentra en el estudio de la regulación directa y de las medidas de incentivo económico, por ser los instrumentos de uso más difundido y los que generan mayor controversia y confusión. Esto no implica que los gastos directos del Estado o la persuasión sean menos importantes. En particular, los gastos del Estado en proyectos con implicancias ambientales han ido en aumento en las últimas dos décadas en todo el mundo, al crecer la conciencia respecto del daño que la contaminación provoca. Se espera que esta tendencia se mantenga. Persiste sin embargo, una clara deficiencia en cuanto a la forma de medir los beneficios asociados a este tipo de proyectos y, por tanto, en muchas ocasiones, se postergan por otros en los cuales los beneficios son más tangibles. Por ejemplo ¿Cómo se pueden establecer los beneficios asociados a una mejor visibilidad o reducción de las tasas de mortalidad y morbilidad por enfermedades respiratorias? es una tarea delicada y controvertible. Por ello se han desarrollado métodos relativamente sofisticados con este fin, en particular los métodos hedónicos y de evaluación contingente (Portney, 1990, Mitchell y Carson, 1988). La experiencia con estos métodos es relativamente reciente pero promisorio, lo que plantea, para Chile, una importante necesidad de investigación a futuro en este ámbito.

En la Tabla N° 12.1 se presentan los instrumentos asociados a las políticas de regulación directa y de incentivo económico, una breve descripción y las ventajas y desventajas de cada uno. En las páginas siguientes se examinará en más detalle cada uno de los instrumentos propuestos.



**Tabla N° 12.1:** Instrumentos de regulación e incentivo de mercado para el control de la contaminación atmosférica

INTRUMENTOS	DESCRIPCION	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>REGULACION DIRECTA</b>			
Estándares de calidad Ambiental.	Establece la contaminación máxima de un contaminante en el aire.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite evaluar la efectividad de la regulación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere conocer los efectos del contaminante.</li> <li>• Insuficiente para promover la regulación de emisiones de parte de fuentes específicas.</li> </ul>
Estándares de Desempeño.	Fija, por fuente, la cantidad o concentración máxima aceptable de un contaminante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Promueve reducción de costos.</li> <li>• Permite flexibilidad para elegir la tecnología de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere altos costos de fiscalización.</li> </ul>
Estándares de diseño tecnológico.	Especifica tecnologías a utilizar por firmas o procesos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite máxima seguridad respecto de resultados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No permite flexibilidad para elegir la tecnología de control.</li> <li>• Requiere altos costos de fiscalización.</li> </ul>
Prohibiciones y estándares para productos y procesos.	Prohíbe o limita el uso de ciertos productos y procesos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elimina o limita la emisión de un contaminante antes que se genere.</li> <li>• Puede reducir los costos de fiscalización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de sustitutos cercanos al producto prohibido.</li> </ul>
Permisos y licencias.	Entrega de autorización para operar.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere que se cumpla con los estándares antes de permitir la operación de la planta.</li> <li>• Facilita la sanción por incumplimiento.</li> <li>• Permite al gobierno retirarlas en caso de necesidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere altos costos de fiscalización.</li> </ul>
Control del uso del espacio.	Regula la localización de fuentes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impide la localización de procesos contaminantes en lugares inadecuados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Afecta los valores de la vivienda.</li> <li>• Vulnerable a presiones políticas económicas y locales.</li> </ul>
<b>INCENTIVO ECONOMICO</b>			
Impuesto a las emisiones.	Cobro por cantidad y/o calidad de un contaminante emitido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera ingresos al Estado.</li> <li>• Incentiva a los que contaminan a reducir emisiones.</li> <li>• Promueve la reducción de costos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente complejos de aplicar.</li> <li>• Altos costos de fiscalización.</li> </ul>
Impuesto a usuarios.	Cobro por utilizar un proceso contaminante.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera ingresos al Estado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complejos de aplicar.</li> </ul>
Impuesto a productos e insumos.	Impuesto al precio del producto o insumos que generan contaminación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera ingresos al Estado.</li> <li>• Promueve el uso de productos limpios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere sustitutos cercanos para los productos e insumos afectados.</li> </ul>
Cobros administrativos.	Cobro por ingresar a una actividad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera recursos.</li> <li>• Facilita fiscalización.</li> <li>• Incentiva uso de productos limpios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campo de aplicación limitado.</li> </ul>
Impuesto diferenciado.	Impuesto menor a productos limpios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentiva el uso de productos limpios.</li> <li>• Bajos costos administrativos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campo de aplicación limitado.</li> </ul>
Permisos transables.	Controla las emisiones vía limitar la cantidad total de emisiones permitidas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentiva reducción de costos.</li> <li>• Genera recursos al Estado.</li> <li>• Incentiva la innovación en tecnologías de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de transacción para las fuentes.</li> <li>• Complejo de aplicar.</li> <li>• Altos costos de fiscalización.</li> <li>• Requiere la creación de mercados.</li> </ul>
Subsidios.	Incentivo económico para acciones que reducen la contaminación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentiva la aplicación de tecnologías/procesos limpios.</li> <li>• Bajos costos de fiscalización.</li> <li>• Incentiva la innovación en tecnologías de control.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perpetúa industrias contaminantes.</li> <li>• Impone costos al contribuyente.</li> </ul>
Sanciones económicas.	Pago por no cumplimiento de regulación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incentiva cumplimiento de normativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe fijarse a un nivel apropiado.</li> <li>• Altos costos administrativos.</li> </ul>

## REGULACION DIRECTA

La regulación directa incluye normas aplicables a tomadores individuales de decisión, exigiendo que la cantidad (o concentración) de algunos de sus insumos o productos —incluidas las emisiones entre los productos— no supere un cierto nivel. Para controlar la contaminación, el enfoque de regulación directa utiliza diversos tipos de estándares, permisos y licencias, y también la reglamentación del uso del espacio. A continuación se describen los instrumentos utilizados comúnmente para mejorar la calidad del aire.

### Estándares

El uso de estándares es el medio predominante para regular la calidad ambiental en el mundo desarrollado (Bernstein, 1991, p. 5). Estos definen las metas de calidad deseadas y establecen la cantidad o concentración permitidas de un contaminante específico.

Pueden, además, tomar diversas formas: estándares de calidad ambiental, de emisión (que incluyen estándares de desempeño y tecnológicos) y estándares a productos y procesos. Estos se detallan a continuación:

**Estándares de calidad ambiental**, establecen la concentración máxima permitida de un contaminante en el aire. Son insuficientes por sí solos para impulsar acciones de reducción a fuentes específicas. Su rol básico es establecer las metas que tanto las políticas de regulación directa como de incentivo económico deben alcanzar.

Por lo general se fijan sobre la base de criterios científicos que establecen el riesgo para una persona de estar expuesta al contaminante. Esto corresponde a lo que se conoce como norma primaria. Las normas secundarias se establecen para proteger además los ecosistemas, visibilidad, materiales, etc. Una característica esencial de estos estándares es que deben establecerse para un período de tiempo, anual o diario. Por ejemplo, la norma anual puede establecer que el promedio de contenido de material particulado en el año no puede superar los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y el promedio diario del mismo contaminante no puede superar los  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Es común el uso conjunto de ambas normas.

**Estándares de desempeño**, fijan a cada fuente emisora, la cantidad o concentración máxima aceptable de un contaminante. Para ello se requiere que el ente regulador defina el permiso de operación de las fuentes en base a sus emisiones. Estas limitaciones pueden dirigirse a una planta completa o a cada chimenea individual. Además, pueden ser únicas o específicas a cada tipo de industria. Se pueden aplicar diferentes estándares a fuentes nuevas y antiguas.

Un ejemplo de este tipo de instrumento es la norma que impone un techo de  $112 \text{ mg}/\text{m}^3$  a las emisiones desde cada fuente fija en Santiago. Este es un estándar que afecta las concentraciones permitidas. Se ha establecido además que las fuentes

actuales pueden emitir un máximo (en kilos) de emisiones diarias. Por medio de Decreto 4 del Ministerio de Salud, se reglamentó que cada fuente puede emitir tan sólo  $56 \text{ mg}/\text{m}^3 \times \text{caudal } \text{m}^3/\text{día} \times 24 \text{ horas}$ . Este estándar afecta las cantidades emitidas. Otro ejemplo es la norma que establece un máximo de emisiones de materia particulado de  $0,124 \text{ gr}/\text{km}$  para los automóviles nuevos de Santiago.

La ventaja de este tipo de instrumento es que permite a cada fuente escoger la forma de cumplir con la norma. Permite flexibilidad de elección de la tecnología más eficiente para un proceso específico. Como contrapartida a esta flexibilidad, existe la dificultad en su aplicación y fiscalización por parte del ente regulador. En particular si se desea establecer normas diferenciadas que reflejen el costo de cada fuente a cumplir con las normas, para así reducir el costo de aplicación de este tipo de política se requiere gran cantidad de información de parte del ente regulador. Esta información exige conocer a fondo los procesos contaminantes y las tecnologías de control más apropiadas. Además, una adecuada fiscalización, puede resultar onerosa para el Estado debido a que cada fuente tiene libertad para elegir la tecnología de control a utilizar.

**Estándares tecnológicos**, determinan las tecnologías específicas que pueden usar las fuentes. No permiten flexibilidad a las fuentes contaminantes para escoger la tecnología. La obligación de usar la “mejor tecnología práctica” o la “mejor tecnología disponible”, son ejemplos de este tipo de instrumento. Una norma que obliga a usar un convertidor catalítico de tres vías para automóviles con motor ciclo Otto, es un ejemplo concreto. Este instrumento es apropiado si existen pocas dudas respecto de la tecnología que permite lograr un cierto estándar de desempeño. Sin embargo, puede imponer un costo excesivo a las fuentes al quitarles flexibilidad para alcanzar la meta de emisión buscada.

Debido a lo fácil que es fiscalizar su cumplimiento, pues basta que el ente regulador observe si han sido instalados o no, se utilizan en aquellos casos en que el control de cada fuente individual es muy costoso o impracticable. Permiten además a los que contaminan, disminuir los costos de información respecto de tecnologías de reducción. Estas dos características hacen atractivo el uso de este tipo de instrumento.

La facilidad para fiscalizar su instalación genera la sensación de que este instrumento protege el ambiente con un alto grado de certidumbre. Sin embargo, esta certidumbre puede ser ilusoria, debido a que las emisiones de un proceso dependen crucialmente de la mantención que se le hace y de la forma de operarlo. Las significativas diferencias de emisiones en vehículos nuevos y en uso son un buen ejemplo de este problema.

Cabe señalar que puede ser difícil establecer si el ente regulador está utilizando estándares de desempeño o tecnológicos. Por ejemplo, se puede fijar el estándar basado en las emisiones que se obtienen al utilizar la mejor tecnología disponible. Si existe sólo una tecnología disponible, ambos estándares son equivalentes.



**Estándares para productos y procesos.** establecen restricciones a la producción y uso de ciertos productos y procesos. Los primeros, establecen un techo para la cantidad total o concentración de contaminantes que pueden descargarse al ambiente por unidad del producto. Por ejemplo, puede estar limitado el contenido de azufre por cada kilo de combustible utilizado. Los estándares para procesos, en cambio, limitan las emisiones asociadas a procesos específicos altamente contaminantes o especialmente nocivos.

En su forma más estricta, se puede llegar a la prohibición de utilizar ciertos productos y procesos. La prohibición de usar gasolina con plomo o la prohibición a que ciertos vehículos entren en una determinada zona, son ejemplos de este tipo de política.

Si bien la prohibición aparece como la forma más estricta de regulación, cuando existen sustitutos cercanos, este tipo de política puede ser eficiente. Incluso, una prohibición anunciada con suficiente anticipación, puede promover la generación de alternativas menos contaminantes de manera mucho más rápida que los mecanismos habituales de mercado.

#### Permisos y licencias

La entrega o retención de permisos de operación —no deben confundirse con los permisos transables que son instrumentos de incentivo económico— licencias, u otra forma de autorización, es una herramienta de control importante. Por lo general estas autorizaciones exigen el cumplimiento de alguno de los estándares antes mencionados, o la adecuada localización de las fuentes. Una de las ventajas de los permisos y licencias es que facilitan la fiscalización de los programas ambientales, al incluir en un sólo documento todas las obligaciones de control ambiental. Otra ventaja es que pueden retirarse o suspenderse en caso de incumplimiento o cambio en las prioridades ambientales. Además, para otorgar el permiso, se puede cobrar una cuota que cubra el costo de su fiscalización.

#### Regulación del uso del espacio

La regulación del uso de espacio, como la zonificación, es un instrumento de carácter local que se puede utilizar para el control ambiental. La zonificación establece regulaciones para el tipo de uso que se puede dar al suelo (residencial, industrial o mixto, por ejemplo), densidad de población, características de la construcción, etc. De esta forma se puede impedir la ubicación de ciertas fuentes en áreas altamente pobladas, o controlar la densidad de población en ciertas zonas. En Brasil, por ejemplo, todas las zonas metropolitanas y casi todas las industriales, deben adoptar programas de zonificación. Los objetivos de este programa incluyen la reubicación de ciertas fuentes y la instalación obligatoria de equipos de control en otras.

### POLITICAS DE INCENTIVO ECONOMICO

Las políticas de incentivo económico incluyen impuestos, permisos transables y subsidios. El concepto de incentivo económico genera confusión: una aplicación "pura" exigiría que los afectados cambien sus decisiones una vez aplicado el instrumento. Como se verá más adelante, en la mayoría de las aplicaciones de impuestos esto no sucede, tampoco es la intención. Es preferible, por ello, establecer los elementos que se consideran comunes a las políticas de incentivo económico, para luego enumerar las utilizadas para regular la contaminación atmosférica. Siguiendo al estudio de la OCDE (1989, pp 14-15), se pueden establecer las siguientes características para una política de incentivo de mercado:

- La existencia de alguna forma de estímulo financiero.
- La posibilidad de acción voluntaria.
- La participación del Estado.
- La intención de mejorar, directa o indirectamente, la calidad del aire.

El último punto puede parecer sorprendente a primera vista, ya que el fin último de las políticas a aplicar es mejorar la calidad del ambiente. Sin embargo, en el caso de los impuestos, una función de gran importancia es la generación de recursos por el Estado. Si éstos se fijan en niveles tan bajos que no afectan significativamente las decisiones de los agentes contaminantes, entonces no incentivan la reducción de contaminación. En este caso, no puede considerarse el impuesto como una política con fines de protección ambiental y, por lo tanto, no es una política de incentivo económico.

En las siguientes secciones se detalla cada instrumento.

#### Impuestos

Los impuestos son un "precio" a ser pagado por quien contamina, lo que autoriza a emitir una cantidad de contaminante proporcional al monto del pago realizado. Este precio, por lo tanto, será considerado por la fuente en su evaluación costo-beneficio. Se espera por ello, que el impuesto genere un incentivo hacia el uso de fuentes más limpias. Por ejemplo, si se establece que por cada kilo de material particulado emitido al día deben pagarse US\$ 5, entonces, una caldera a leña que emite cuarenta kilos por día, deberá pagar US\$ 200 diarios y, por lo tanto, cerca de US\$ 50.000 al año por sus emisiones. Esto puede generar un incentivo suficiente para que el dueño de la fuente decida cambiarla por una menos contaminante, por ejemplo una caldera a petróleo-2, o incluso a gas. En este último caso, debido a la sustancial reducción en las emisiones, la fuente se vería obligada a pagar menos de US\$ 2.000 al año por sus emisiones, logrando así un ahorro importante que puede compensar con creces los costos adicionales generados por el cambio de combustible. De esta forma, la magnitud del incentivo depende fundamentalmente del impuesto que produce la aplicación del impuesto en los costos de producción y en el precio final del bien.

Además de su rol de incentivo, los impuestos tienen un impacto redistributivo, ya que estos recursos son traspasados desde las fuentes emisoras hacia el Estado. Esto hace muy atractiva su aplicación desde la perspectiva del ente regulador, y es precisamente este rol el que predomina en el uso de impuestos. La otra cara de la medalla es que su mayor impacto financiero genera resistencia en los contribuyentes afectados.

Otra característica de los impuestos es que el resultado final de la política es incierto, ya que no es posible determinar con certeza la calidad de aire que se logrará una vez aplicados. Un primer problema, es que se requiere mucha información respecto de su impacto sobre los costos y precios de los productores, para establecer la respuesta de éstos en términos de su reducción de emisiones. El proceso de determinación de los niveles del impuesto puede ser largo, políticamente poco atractivo y sujeto a múltiples presiones. Esto complica cambiarlos si se fijan de manera inadecuada. Esta relativa rigidez lleva además a un segundo problema. Si el crecimiento económico conduce a la creación de nuevas fuentes contaminantes, será necesario aumentar los impuestos para mantener las emisiones en un nivel adecuado. Esto se ve dificultado si el proceso de cambio es engorroso.

Los impuestos pueden tomar diversas formas:

**Impuesto a las emisiones**, es un cobro por la cantidad y/o calidad emitida de un contaminante. Impone el pago de una cantidad determinada por cada unidad de contaminante emitido en un período de tiempo. Un ejemplo de este tipo de instrumento se presentó en el párrafo anterior. Si el impuesto se calcula bien, llevará precisamente a la meta de calidad de aire establecida por el ente regulador.

En teoría, estos impuestos tienen múltiples ventajas: permiten a las fuentes elegir las tecnologías de reducción, y con ello éstas probablemente usarán la de menor costo; incentivan la innovación tecnológica, pues si una empresa emite menos, paga menos; generan, además, recursos al Estado, que pueden usarse, por ejemplo, en las tareas de fiscalización.

En la práctica, su aplicación es compleja. Por una parte, las fuentes emisoras se oponen a niveles muy altos de impuestos, pues les exige un desembolso significativo. Estas deben invertir en una tecnología de reducción de emisiones para no pagar tanto. Pero, una vez hecha la inversión, igualmente deben pagar por cada kilo que emiten. Este último pago puede llegar a ser más alto que el costo de la tecnología de reducción misma. El alto costo total para las fuentes contaminantes convierte al impuesto en un instrumento de difícil aplicación con fines de incentivo.

Por otra parte, para contaminantes de impacto local, como la contaminación por partículas, el nivel del impuesto debe ser diferente según la zona de la ciudad en que se aplique. Por ejemplo, si en una zona hay sólo una fuente de emisión pequeña, puede no ser necesario imponer una reducción. En este caso el impuesto se fijará en un nivel cero, de manera que la fuente no incurra en gastos por sus emisiones. Sin embargo, la misma fuente en una zona altamente contaminada, debería pagar un impuesto

significativo (junto a las demás fuentes que impactan esa zona). Esto lleva problemas legales y de modelación complejos y exigen que el ente regulador maneje un gran volumen de información para tomar decisiones apropiadas.

**Impuesto a usuarios**, es un cobro por utilizar un proceso contaminante. Esto es una forma indirecta de cobrar por las emisiones que genera el proceso. Ejemplo de este tipo de instrumento es el impuesto zonal a los vehículos, que establece un pago (que puede ser diferenciado por tipo de vehículo) por ingresar al Centro de ciudad. Si el impuesto es suficientemente alto, incentivará el uso de medios alternativos menos contaminantes, como por ejemplo el Metro.

**Impuesto a productos o insumos**, es un impuesto aplicado al precio de productos o insumos que generan contaminación, ya sea en la etapa de producción o de consumo. Es también un instrumento indirecto. Por ejemplo, el cobro por contenido de azufre del combustible utilizado en procesos de combustión: a mayor contenido de azufre, mayor pago por cada unidad del combustible utilizado. E incentiva el uso de combustibles con menor contenido de azufre. La efectividad de este instrumento depende crucialmente de la disponibilidad de sustitutos cercanos. El costo de los insumos es una fracción pequeña del costo total del producto, improbable que aún duplicando su costo, vía un alto impuesto, disminuya significativamente su uso, a menos que exista un sustituto cercano a mejor precio.

**Cobros administrativos**, tales como los permisos de operación y circulación. Por lo general se utilizan para generar ingresos al Estado. Sin embargo, pueden tener un rol de incentivo si se aplican de manera diferenciada según el grado de contaminación: cobrar más por permisos de circulación para vehículos más antiguos.

**Impuesto diferenciado**, es aquel que favorece, con su precio, a los productos limpios desincentivando a los productos contaminantes. Para ello, sobre la tasa de impuesto propia de un producto, se agrega la combinación de una sobretasa para el producto contaminante y una reducción para los productos limpios. La sobretasa y reducción pueden calcularse de tal modo que el presupuesto del Estado no se vea afectado. Se utiliza comúnmente en transporte, para desincentivar el uso de vehículos o combustibles contaminantes. El uso de impuestos diferenciados para las gasolinas con y sin plomo, es una práctica común en los países de la OCDE.

#### Permisos transables

Los permisos transables se inscriben en la corriente económica que visualiza las externalidades como un problema originado en la ausencia de un mercado para el **aire limpio**. La no existencia de mercado se origina, a su vez, en la falta de claridad respecto de los derechos de propiedad sobre el aire limpio. La solución es definir estos derechos y promover la creación de un **mercado** donde éstos se transen.



En este mercado, el que desee contaminar el aire, debe comprar el derecho correspondiente. Estos derechos son finitos y fijos, por lo cual, queda definida a priori la calidad del aire que se logrará una vez que queden consumadas todas las transacciones.

Uno de los instrumentos utilizados para **crear un mercado** es el permiso transable. Bajo este sistema, el ente regulador define una meta de calidad del aire o de emisiones a lograr. Este nivel se traduce en un total de unidades de emisión permitidas, las que luego se entregan a las fuentes emisoras en la forma de permisos. Cada permiso autoriza, al que lo posee, a emitir una cierta cantidad del contaminante por unidad de tiempo. Por ejemplo, un kilo de material particulado por día. Si lo desea, el dueño del permiso puede usarlo, emitiendo el kilo autorizado, o transferirlo a otra fuente, cediendo así su derecho.

La transferibilidad es una característica esencial de este instrumento. Es precisamente en este proceso de transferencia que se crea un mercado por el permiso: fuentes que no los requieren o para quienes es de bajo costo reducir su nivel de contaminación, estarán dispuestas a vender sus permisos a otras fuentes obligadas a reducir, pero para quienes es de alto costo hacerlo. Se generará así una oferta de permisos de parte de quienes están dispuestos a vender, y una demanda por los permisos de parte de las fuentes con alto costo de reducción, dispuestas a comprarlos si el precio de los mismos es adecuado. Este precio puede resultar de negociaciones directas entre las fuentes, o, si hay un número significativo de fuentes, resultará del libre juego de oferta y demanda.

El resultado neto de este proceso es que se logra la calidad del aire autorizada por el número de permisos disponibles, pero, las fuentes que incorporan las reducciones son aquellas para las que es de bajo costo hacerlo. Así, como resultado de estas transacciones, se gana en flexibilidad para lograr la meta de calidad del aire buscada y se reducen los costos asociados a su logro. Lo que significa, en el lenguaje de los economistas, ganar en eficiencia. Esta es una de las principales razones para usar este tipo de instrumento.

Otra de sus ventajas es que permite el crecimiento económico de la ciudad, sin que aumente la contaminación. En efecto, al establecer un número fijo de permisos, se congelan las emisiones totales en la ciudad. Sin embargo como estos permisos pueden transarse, una empresa que desee ingresar al mercado puede hacerlo simplemente comprando los permisos respectivos por sus emisiones. De la misma manera, este sistema genera incentivos para la innovación de tecnologías de control, ya que los logros en la reducción de emisiones permitirán liberar permisos que pueden venderse. Finalmente, tiene la ventaja, respecto del uso de impuestos a las emisiones, de no imponer una carga financiera adicional a las fuentes contaminantes. Si los permisos se reparten gratis inicialmente, se está autorizando a las fuentes a emitir, sin que deban pagar por estas emisiones. Esto hace que esta política sea más aceptable que el uso de impuestos.

Desafortunadamente, la aplicación de un sistema de permisos transables puede ser relativamente compleja. Un primer problema es definir quién puede intercambiar

con quién. La variable espacial es de gran importancia en algunos contaminantes. Se emite una unidad de material particulado en Renca, el impacto más importante es en el entorno de la fuente. Obviamente, los que viven cerca de ella, no ganarán nada si una fuente ubicada en San Bernardo reduce una unidad como compensación. En caso, es necesario establecer tasas de intercambio que varíen de acuerdo a la distancia entre las fuentes: a mayor distancia, mayor será el número de unidades de emisión que deberá reducir la fuente lejana. Otra alternativa, es establecer múltiples mercados pequeños, dentro de los cuales las fuentes, cercanas entre sí, puedan intercambiar uno a uno. En este último caso, se puede permitir además, la transacción con fuentes más lejanas, de acuerdo a las tasas de intercambio. El problema de fondo, es que este tipo de contaminante no se distribuye de manera uniforme, su impacto depende de manera fundamental del lugar donde es emitido. En este caso, es necesario aplicar un sistema de permisos diferenciados espacialmente, denominado **sistema de permisos ambientales**.

Existe otro tipo de contaminantes uniformemente distribuidos, en los que el impacto ambiental se debe al total de las emisiones sobre la ciudad y no se relaciona directamente con el lugar donde fueron emitidos. Este es el caso de los compuestos orgánicos volátiles, como precursores del ozono y de los óxidos de azufre en cuanto a su impacto en la lluvia ácida. Para estos contaminantes, el diseño del sistema de permisos se simplifica enormemente. Una fuente ubicada en Renca, puede intercambiar uno a uno con otra ubicada en San Bernardo, sin que empeore la calidad del aire en ninguna zona. En este caso se puede utilizar un **sistema de permisos de emisión**. Por este motivo, las transacciones bajo este sistema son mucho más simples que bajo el sistema de permisos ambientales.

Además de la variable espacial, está el problema del contenido específico de las emisiones de cada fuente. Las partículas menores a  $10 \mu m$  pueden contener sustancias tóxicas y carcinógenas, además de producir efectos respiratorios agudos y crónicos. Dos fuentes cercanas pueden emitir material particulado de distinto tipo. El daño resultante a la salud es, por tanto, distinto y puede ser necesario impedir el intercambio uno a uno entre las emisiones de estas fuentes. La dificultad para el ente regulador en este caso, es definir con claridad el objetivo buscado con la meta establecida. Lo que se busca es reducir los problemas respiratorios agudos, entonces se puede permitir el intercambio directo entre estas emisiones. Si se busca además reducir las incidencias de cáncer asociadas a estas emisiones, entonces será necesario imponer restricciones adicionales a los intercambios permitidos. Un instrumento simple basta en este caso, pues se buscan múltiples objetivos simultáneamente.

Otra dificultad, es asegurar que efectivamente se genere un mercado para los permisos. De no crearse, puede resultar difícil que se logren los beneficios aquí señalados, en particular, si, debido a las características del contaminante, es necesario crear varias zonas, ya que puede quedar alguna de ellas con pocas fuentes. Una fuente que busca comprar permisos puede no encontrar con quien transar y, como resultado, se verá obligada a utilizar tecnologías de reducción de alto costo. Fuentes potenciales



pueden no encontrar permisos disponibles y desistir de la producción, lo que podría generar un estancamiento en la economía de la ciudad.

Por ello, un rol central del ente regulador es facilitar las transacciones, tanto en el diseño del sistema como en su operación, de manera de lograr un equilibrio entre calidad del aire y facilidad de transacción. El diseño debe incluir el número suficiente de mercados como para no comprometer la calidad del aire en alguna zona y, a la vez, asegurar que exista el número adecuado de oferentes y demandantes en cada zona.

Puede ser dificultoso, también, definir cómo se distribuirán inicialmente los permisos. Si el Estado los vende, generará recursos que luego puede usar para financiar las tareas de fiscalización, entre otras cosas. Sin embargo, con ello se perderá una de las ventajas que ellos tienen respecto de los impuestos, su aceptabilidad por parte de las fuentes afectadas. Si se distribuyen gratis, el problema es crear un mecanismo "justo" para ello. En particular porque se estaría generando una ventaja para las fuentes actuales por sobre las futuras, ya que estas últimas no reciben permisos y por lo tanto se encuentran en desventaja respecto de las primeras.

### Subsidios

Los subsidios son formas de asistencia financiera con el objetivo de incentivar un cambio de comportamiento en los que contaminan, o bien que se entregan a las empresas con problemas para cumplir con las normas. Los más comunes son:

*Asistencia financiera directa*, se provee sólo si la firma toma acciones para descontaminar. Por ejemplo, se puede apoyar el cambio a tecnologías más limpias, o subsidiar la capacitación de trabajadores. Esta asistencia puede entregarse también a institutos de investigación para desarrollar tecnologías, o a los gobiernos locales para apoyar la adopción de nuevas tecnologías o normas.

*Préstamos blandos*, de interés bajo la tasa de mercado, que se entregan si la empresa aplica medidas de descontaminación.

*Incentivos impositivos*, son aquellos que favorecen a los actores, permitiéndoles la depreciación acelerada u otras formas de ventajas impositivas, siempre que se tomen medidas destinadas a reducir la contaminación. En Louisiana, Estados Unidos, el impuesto a la propiedad que pagan las empresas, depende del desempeño ambiental de las mismas (Schneider, 1991). Estos incentivos deben utilizarse sólo donde se pueda demostrar que el costo de la normativa ambiental produce claros y serios problemas financieros a la empresa. Un ejemplo de su aplicación, es aquella que incentiva la ubicación de fuentes emisoras lejos de centros urbanos.

Los subsidios, proveen incentivos directos a las empresas para reducir emisiones, sin embargo, deben usarse con discreción. En primer término, el costo de esta política lo absorben los contribuyentes y no la industria. Además, si bien pueden

incentivar a una firma individual a reducir sus emisiones, pueden inducir a que nuevas firmas contaminantes, que de otra manera no podrían iniciar la producción, comiencen a hacerlo y, como resultado, puede aumentar la suma total de emisiones (Baum y Oates, 1988, pp. 211-234). Por ello, su mayor contribución es hacer posible una política estricta, favoreciendo a empresas específicas que se verían obligadas a retirarse si se les impone todo el peso de las reducciones de una vez. También puede estimular la investigación y desarrollo de alternativas tecnológicas, que en ausencia de un subsidio, no se desarrollarían.



## POLITICAS PARA EL CONTROL DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA: PATRONES OBSERVADOS

En primer lugar, veremos la importancia de la regulación directa como política de protección ambiental. Luego, examinaremos políticas aplicadas para la reducción de la contaminación atmosférica. Finalmente, se establecerán los patrones observados en el diseño y desempeño de estas políticas.

### POLITICAS AMBIENTALES: LA IMPORTANCIA DE LA REGULACION DIRECTA

Para examinar la aplicabilidad de cada tipo de política, es interesante resumir las tendencias que se observan en su aplicación, no sólo para controlar la contaminación atmosférica, sino también la contaminación de las aguas superficiales donde ha desarrollado una extensa labor de regulación.

Claramente, la regulación directa ha sido la política dominante en la protección ambiental, tanto en los Estados Unidos como en los demás países de la OCDE. En un extenso informe de dicho organismo sobre el uso de instrumentos de incentivo económico en los países miembro, basado en estudios de caso realizados en Alemania, Francia, Holanda, Italia, Suecia y los Estados Unidos, donde además se recopilaron antecedentes sobre Australia, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Noruega, el Reino Unido y Suiza; se sostiene que:

"Una comparación internacional de la aplicación de legislación ambiental permite generalizar esto: los gobiernos han tendido a recurrir a políticas de regulación directa en conjunto con los sistemas de fiscalización y sanción respectivos" (OCD 1989, p. 25).

En los Estados Unidos, el Clean Air Act y Clean Water Act - actas que establecen los objetivos y medios a aplicar en la protección del aire y el agua respectivamente -, descansan de manera fundamental en el uso de la **mejor tecnología** d



**ponible y la mejor tecnología práctica.** Las normas han tendido a ser relativamente uniformes, y se le ha dado preeminencia al enfoque de regulación por sobre el de incentivos económicos (Portney, 1990, p. 20-21).

La mayor ventaja de la regulación directa es que permite, al ente regulador, predecir de manera razonable el resultado de las políticas que se aplican. Su uso ha permitido el logro de reducciones significativas en la contaminación atmosférica en diversas ciudades del mundo. Sin embargo, existen al menos cuatro razones que han llevado a la búsqueda de alternativas más flexibles. Primero, la regulación directa no ha permitido el logro de las metas de calidad establecidas. Segundo, son económicamente ineficientes, ya que no permiten flexibilidad en cuanto a que las fuentes con menor costo en la reducción de emisiones contaminantes, sean las que reduzcan. Los altos costos de reducción, han llevado en ocasiones a que las fuentes se opongan a la legislación vigente, y sus argumentos han sido aceptados por más de un tribunal. Tercero, exigen del ente regulador, la capacidad de identificar tecnologías de control razonables para cada tipo de proceso, lo que le impone una pesada carga en términos de información y personal experto. Por último, no incentivan la innovación en tecnologías de control para fuentes que ya están cumpliendo con la meta establecida. Una vez que se cumple con la norma, no hay razón para aplicar una tecnología mejor si esta aparece.

En años recientes, muchos países han comenzado a adoptar políticas de incentivo económico, en combinación con la regulación directa. Como se ha señalado, éstas introducen más flexibilidad y eficiencia al sistema de control. En particular, promueven el logro de las metas utilizando las tecnologías de mínimo costo; estimulan el desarrollo de tecnologías de control y generación de **expertise** en el sector privado; proveen al Estado de una fuente de ingresos; permiten flexibilidad en la selección de tecnologías; y, eliminan también, la necesidad de que el ente regulador maneje una gran cantidad de información detallada sobre procesos y tecnologías (Bernstein, 1991, p.3).

Por cierto, también tienen desventajas. La principal es que sus resultados son menos predecibles que los de la regulación directa, ya que el que contamina elige cuánto reducir. Si se fija el impuesto en un nivel muy bajo, o se entrega un número excesivo de permisos, no se logrará la meta buscada. Además, se requiere una institucionalidad sofisticada, capaz de aplicar y luego controlar este tipo de instrumentos. Considerando las deficiencias que se producen en los países en desarrollo con la aplicación de políticas simples, esta dificultad no deja de ser relevante.

El uso de estos instrumentos es aún incipiente. Su importancia varía según el medio, sector específico, y país estudiado. En Estados Unidos, se ha desarrollado un esfuerzo de desregulación significativo, que ha llevado a que las políticas de incentivo económico jueguen un rol más importante. El uso de impuestos a la descarga de contaminantes, y subsidios significativos para la aplicación de tecnologías limpias, han sido instrumentos valiosos para controlar las descargas al agua. En 1990, se introdujeron cambios al Clean air Act para incorporar explícitamente el uso

de estos instrumentos, y la EPA, ha desarrollado un programa de permisos transable para emisiones de  $\text{SO}_2$ . Como resultado, Estados Unidos es el país líder en aplicación de instrumentos de incentivo, en particular, para el control de las emisiones desde fuentes fijas. En Francia, los instrumentos económicos juegan un rol menor en la gestión de desechos sólidos, ruido y contaminación atmosférica. En el control de la contaminación de aguas, son más importantes donde los programas de descontaminación dependen de los fondos recaudados a partir de los impuestos a las descargas. En Alemania, los programas se aplican fundamentalmente vía regulación directa. En aire, se utilizan estándares específicos para cada fuente, los impuestos consideran inaplicables, y no existen sistemas de permisos. En aguas en cambio, utiliza un sistema combinado de regulación directa e impuestos. Se aplica un impuesto, cuyo monto, disminuye al acercarse las descargas a las permitidas por estándar de descarga establecido para el contaminante. Este es el único impuesto que se utiliza en aguas con un objetivo de incentivo. La generación de ingresos para el Estado tiene poca importancia en este caso. En Italia, Holanda y Suecia, los instrumentos económicos se consideran un complemento importante por su carácter de generador de recursos, no como herramientas que lleven a una reducción de contaminación.

#### **POLÍTICAS PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN PAÍSES SELECCIONADOS.**

Existen numerosos ejemplos de aplicación de las políticas presentadas hasta ahora. Veremos las principales de ellas, aplicadas al control de las emisiones de fuentes móviles y fuentes fijas. En primer término se examinan las políticas de regulación directa y luego las de incentivo económico.

#### **REGULACION DIRECTA**

El uso de **estándares ambientales** es el instrumento principal de regulación directa. Establecen la meta que tanto los enfoques de regulación como los económicos, deben alcanzar. En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha establecido dos niveles de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (NAAQS): los estándares primarios se establecen a un nivel apropiado para proteger la salud humana; los estándares secundarios protegen el bienestar e incluyen efectos sobre suelo, agua, cultivos, vegetación, materiales, animales, vida silvestre, clima, visibilidad, daño a la propiedad, etc. En 1989, la EPA había establecido estándares para los contaminantes: dióxido de azufre, material particulado, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono y plomo.

Para fuentes móviles, el Clean Air Act establece **estándares de emisión (de desempeño y tecnológicos)** aplicables a automóviles, camiones, buses y motocicletas en los Estados Unidos. Las primeras normas se establecieron en 1963, y se han i

haciendo progresivamente más estrictas y comprensivas, siendo las últimas las de 1990. Cumplir con las normas era, originalmente, responsabilidad de los fabricantes de automóviles. Sin embargo, en la actualidad, se ha traspasado parte de la responsabilidad a los usuarios de vehículos, al obligarles a hacer una revisión periódica de los mismos.

El uso de **estándares a los productos**, toma la forma de prohibiciones a la venta de gasolinas con contenido de ciertos elementos. Por ejemplo, para combatir el problema de ozono, el programa de gasolinas reformuladas establece que esta gasolina no puede contener más de 25 por ciento de aromáticos, debe contener al menos 2 por ciento de oxígeno, etc. Otro programa, que combina estándares de emisión y de productos, establece que para el año 1999, deberán cumplir con estándares de emisión estrictísimos 300.000 automóviles, utilizando cualquier combinación de tecnologías y combustibles.

Para fuentes fijas, la normativa de mayor impacto en los Estados Unidos, ha sido la aplicación de **estándares de desempeño** para fuentes industriales nuevas (NSPS). Establecen el máximo de emisiones permisibles para fuentes nuevas o modificadas que estén consideradas como **grandes emisores**, basándose en el **mejor sistema tecnológico de reducción continua de emisiones**, y considerando la posibilidad efectiva de financiar la aplicación de la tecnología.

Para fuentes actuales, se distingue entre aquellas que emiten más de 10 toneladas de un contaminante al año, las que lo hacen en más de 25 toneladas de la suma de contaminantes, y las fuentes grupales. La EPA, ha establecido estándares diferenciados para más de 40 categorías de fuentes, basados en la mejor tecnología demostrada, estableciendo también, plazos para el cumplimiento de las mismas. En China en cambio, los estándares son uniformes para un mismo contaminante. Sin embargo, los requerimientos de reducción de  $\text{SO}_2$  para plantas generadoras de electricidad, son diferenciados, pues dependen del contenido de azufre del combustible que se utiliza (Bernstein, p.45). En Suecia, el instrumento principal para reducir las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$ , es el uso de estándares de emisión diferenciados. El cuadro siguiente presenta los estándares utilizados [Nyquist, 1992].

Finalmente, el uso de **estándares para productos y procesos**, es común para regular las emisiones producidas desde artefactos domésticos. Por ejemplo, los aparatos de calefacción deben cumplir con una serie de requisitos, en particular utilizar el combustible para el que fueron diseñados y calibrados. En Bélgica, el combustible utilizado no puede tener un contenido de azufre mayor al 1%. En Hong Kong, se prohibió el uso de petróleos pesados en la industria. Como resultado, las emisiones de dióxido de azufre se redujeron en un 80%. Esta prohibición, es fácil de fiscalizar pues sólo requiere inspeccionar el contenido de los estanques, y además, se sanciona a los que la violan con seis meses de cárcel.

**Tabla N° 12.2:** Estándares de emisión suecos para azufre y dióxido de nitrógeno

Descripción	Azufre (mg/MJ)	Dióxido de Nitrógeno (mg/MJ)
Plantas grandes existentes (*)	50	50 - 100
Plantas pequeñas existentes	100	100 - 200
Plantas nuevas a carbón > 500 MW	30	30
Plantas nuevas a carbón < 500 MW	50	50
Plantas nuevas grandes (**), otros combustibles	50	50 - 100
Plantas nuevas pequeñas, otros combustibles	100	100 - 200

(\*) > 400 toneladas S/año, > 600 toneladas  $\text{NO}_2$ /año.

(\*\*) > 400 toneladas S/año, > 300 toneladas  $\text{NO}_2$ /año.

Fuente: Nyquist, 1992.

## POLÍTICAS DE INCENTIVO ECONOMICO

Los **impuestos a las emisiones** no juegan un rol significativo en el control de la contaminación. Una explicación posible es, que los fondos recaudados no pueden utilizarse después para "tratar" el aire, como sucede en el caso del agua. Además, fiscalizar las emisiones para establecer los montos a pagar es complicado. En Francia se utilizó hasta 1990 un impuesto a las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno. Sólo se aplicó a 400 fuentes grandes. Los fondos recaudados, se utilizaron para financiar investigación en tecnologías para reducir la contaminación del aire. En China, se ha aplicado un sistema de impuestos a las emisiones, y los fondos recaudados se utilizan para financiar parcialmente inversiones en equipos de control [Krupnick y Sebastian, 1990]. En ambos casos el impuesto es muy bajo para tener algún efecto de incentivo.

Uno de los ejemplos más interesantes de **impuesto a usuarios**, es el uso de un impuesto zonal, utilizado en Singapur para reducir el ingreso de automóviles y taxis a la zona céntrica de la ciudad. Con este sistema, los automovilistas se ven obligados a comprar un permiso para entrar al centro en los momentos de mayor tránsito vehicular. Esta medida, más el aumento de las tarifas de parquímetros (otro impuesto a usuarios), redujo en un 71% el número de automóviles y taxis que ingresaban al centro. Por cierto que un esquema de este tipo, puede provocar problemas de congestión en otras arterias o zonas de la ciudad donde no se aplica. Es preferible un sistema a nivel de toda la ciudad, como el de Estocolmo, Suecia, donde se aplica un cobro por tramo utilizado.

Los **impuestos diferenciados**, han sido utilizados para mejorar el precio de



lativo de vehículos limpios, y favorecer la introducción de combustibles alternativos. En Suecia, un impuesto especial se aplica a vehículos sin convertidor catalítico y se da un subsidio a aquellos con convertidor. De acuerdo a Tietenberg (1990), esta política ha sido exitosa en cuanto a incorporar vehículos limpios a una tasa mucho más rápida de lo normal. El impacto de este programa en términos de ingresos no ha sido neutral: los pagos por subsidio exceden largamente el ingreso por el impuesto. También se ha aplicado para incentivar el uso de gasolina sin plomo, sin embargo los resultados no han sido alentadores. En Noruega, impuestos aplicados al contenido de azufre en el combustible han incentivado el uso de combustibles menos contaminantes.

Finalmente, los **permisos transables** se han aplicado en su forma pura de manera puntual. Además, las aplicaciones son para contaminantes que se distribuyen uniformemente. Su uso, ha sido introducido recientemente para el control de las emisiones de dióxido de azufre desde centrales térmicas en los Estados Unidos, (Clean Air Act Amendments de 1990). El objetivo de este programa es reducir la lluvia ácida, siendo el primero que utiliza los permisos transables a gran escala. De acuerdo con él, cada central, recibe un número limitado de permisos que luego utiliza o transa en el mercado. Las expectativas sobre el desarrollo vigoroso de un mercado para la transacción de estos permisos, ha llevado a que se cree un mercado de futuros de éstos en la Bolsa de Valores de Chicago. Sus resultados aún están por verse. En 1988, la EPA fijó un techo para las emisiones de sustancias que atacan la capa de ozono, pero permitió que las fuentes emisoras intercambien permisos entre sí (Tietenberg, 1992, pp.4-7). El gobierno de Singapur, por su parte, en un esfuerzo por reducir las emisiones de CFC, ha establecido un sistema de permisos, por el cual, las empresas que deseen emitir CFC, deben comprar los permisos necesarios. El total de permisos es limitado, lo que produce un aumento de precios que ha llevado a muchas fuentes a buscar sustitutos.

El programa con más historia en esta línea, en los Estados Unidos, es el **Programa de Transacción de Emisiones** establecido por la EPA que, con sucesivas modificaciones y mejoras, ha estado en operación por cerca de quince años. Según este programa, cualquier fuente que reduce emisiones en una de sus chimeneas, más allá de lo requerido por el estándar, puede solicitar un "crédito por reducción de emisiones" (CRE). Este CRE certifica la reducción y puede utilizarse para aumentar las emisiones en otra chimenea de la misma empresa o incluso venderse a otras fuentes. Los CRE se pueden utilizar bajo tres modalidades (**netting**, **bubbling** y **offsetting**), o guardarse para uso futuro (**banking**). Los resultados de este sistema son mixtos. Ha aumentado la flexibilidad, pero los intercambios han sido básicamente entre fuentes (chimeneas) de una misma empresa. Las transacciones entre distintas empresas son escasas. Además no se ha generado un mercado activo por los CRE. Cabe señalar que este programa no es lo que la teoría económica considera un sistema de permisos transables, sino más bien, un complemento al enfoque regulatorio tradicional. Los intercambios son un proceso de negociación entre los interesados, supervisados por el ente regulador, caso por caso (Tietenberg, 1992, p.17).

A pesar de ello, se estima que los ahorros en costos de inversión, por utilizar esta política, superan los US\$ 12 mil millones, correspondientes a entre siete y doce mil transacciones, aproximadamente (Tietenberg, 1992, p.19). Esta suma, a pesar de no ser despreciable, está lejos de los ahorros potenciales esperados del programa. Diversas razones explican esta diferencia. Primero, los modelos utilizados sobreestiman las ganancias potenciales, ya que asumen que todos los intercambios se realizan de manera simultánea. En la práctica esto no sucede. Además el ente regulador ha establecido una serie de restricciones a los intercambios, lo que disminuye su atractivo para los posibles usuarios del sistema.

Finalmente, el impacto de este sistema en la calidad del aire ha sido baja. Como resultado de su aplicación no ha habido una mejora sustancial, pero ésta tampoco empeorado.

## CONCLUSIONES: PATRONES OBSERVADOS EN EL DISEÑO Y DESEMPEÑO DE POLÍTICAS

Lo expuesto hasta ahora permite distinguir ciertos patrones, tanto en el diseño como en el desempeño de políticas. Estos patrones basados en un estudio de R. H. y G. Hester (1989), se presentan a continuación.

**Dominancia de la regulación directa.** Los controles directos han sido las principales políticas aplicadas para la regulación ambiental, y sólo una pequeña fracción de los instrumentos de incentivo económico, han sido utilizados con el objetivo de incentivar mejoras en la calidad del aire. Los motivos son múltiples. En la mayoría de los países, la regulación directa ha sido la forma en que se ha hecho la política ambiental desde sus inicios. Esto ha generado estructuras y procedimientos burocráticos que se resisten al uso de instrumentos nuevos. Además, los impuestos son rechazados por los que contaminan, ya que les imponen una carga adicional sobre la obligación de reducir emisiones. Por otra parte, el uso de instrumentos económicos, requiere entregar flexibilidad a las fuentes contaminantes, lo que causa suspicacias tanto en grupos ambientalistas como en algunos entes reguladores.

Las razones anteriores son de carácter institucional y político, existen también razones de orden práctico que dificultan el uso de instrumentos de incentivo económico. Los modelos que sugieren que las ganancias de utilizar estas políticas son sustanciales, no consideran que la contaminación es un problema complejo, multidimensional. El uso de estas políticas se complica, debido a que el número de instrumentos o la complejidad de su diseño, los hace impracticables; los costos administrativos de su aplicación suelen ser altos; y su fiscalización, costosa.

**Los impuestos se usan básicamente para recaudar fondos.** La motivación



básica para aplicar impuestos es la de recaudar fondos. El efecto de incentivo para reducir emisiones es importante sólo en casos aislados debido a que, por lo general, los impuestos aplicados son muy bajos.

Los fondos recaudados casi siempre se reinvierten en actividades que mejoran la calidad ambiental. Como proveer de subsidios, ayudas financieras directas o préstamos a empresas privadas, o inversiones en plantas de tratamiento. También se utilizan para financiar las actividades de fiscalización. Esta característica es importante ya que hace más aceptable su aplicación de parte de los afectados directos.

**Los impuestos tienen impacto ambiental positivo.** Aún cuando no se han utilizado para incentivar a las empresas a que reduzcan sus emisiones, los impuestos se perciben como beneficiosos en términos de su impacto ambiental. Particularmente, en cuanto al uso de los fondos recaudados para actividades de mejora al medio ambiente.

**Los impuestos aumentan con el tiempo.** Se observa una tendencia al aumento de los impuestos por sobre la inflación. Esto es una forma de superar los obstáculos iniciales a su aplicación y de establecer si operan de la manera deseada.

**Los permisos transables son instrumentos que reducen los costos de las políticas ambientales.** La motivación principal para el uso de sistemas de permisos transables, es permitir el logro de una meta de calidad de aire con mayor flexibilidad. Las empresas, pueden aprovechar esta flexibilidad para reducir los costos de cumplir con la meta establecida.

**El desempeño de los permisos transables depende de las reglas que lo rigen.** El ente regulador debe imponer el menor número de reglas posible, siempre relacionadas con el logro de los objetivos buscados. Es necesario facilitar al máximo las transacciones para sacar el mayor provecho de la flexibilidad que ofrecen.

**Los sistemas de permisos transables, han operado mejor para contaminantes uniformemente distribuidos o, para fuentes contiguas, en el caso de contaminantes no uniformemente distribuidos.** No es sorprendente que la mayor parte de las transacciones observadas sean dentro de una misma empresa. Con ello, se evita la necesidad de modelar el impacto de las emisiones de fuentes lejanas entre sí. Por la misma razón, la mayor parte de los intercambios realizados, es para los compuestos orgánicos volátiles, contaminantes uniformemente distribuidos.

**Los permisos tienen un impacto neutro o positivo sobre la calidad ambiental.** De esta forma, se debilita uno de los argumentos utilizados frecuentemente en contra de este tipo de instrumentos, que permiten el aumento de la contaminación.

**El uso de impuestos es más común que el de permisos transables.**



## POLÍTICA AMBIENTAL PARA SANTIAGO: CONTEXTO Y CRITERIOS

Se han presentado, hasta el momento, las políticas disponibles para mejorar calidad del aire, dando ejemplos de su aplicación y se ha discutido, también, acerca de sus ventajas y desventajas. Quizás la conclusión más importante, respecto a qué instrumentos utilizar para mejorar la calidad de aire en Santiago, es que no existe una receta única que garantice el éxito. Se requiere de una apropiada mezcla de políticas, donde tanto la regulación directa como las políticas de incentivo económico juegan roles complementarios. Las políticas de incentivo económico, han ampliado el espectro de posibilidades abiertas al ente regulador, y su uso permite flexibilidad en el cumplimiento de las normas establecidas. El marco requerido para la protección ambiental en Santiago debe, por tanto, facilitar la aplicación de ambos tipos de políticas.

La definición de esta mezcla es más un arte que una ciencia exacta y requiere un proceso de aprendizaje del ente regulador en conjunto con los principales actores involucrados, Ministerios, empresarios, autoridades locales, grupos ambientalistas y ciudadanos. Hay diversos elementos del contexto que el ente regulador debe tener en cuenta para establecer esta mezcla. Estos elementos incluyen:

- La importancia que se asigna a la eficiencia de las políticas, es decir, que permita reducir la contaminación a mínimo costo. Si este factor es importante, será necesario explorar a fondo el uso de mecanismos de incentivo de mercado. En cambio, si es secundario, se pueden utilizar instrumentos de regulación directa y complementarlos con incentivos económicos. Esta decisión se hace más compleja si se agregan elementos de eficiencia dinámica. El ente regulador, puede estar interesado en que se desarrollen y apliquen tecnologías más eficientes a futuro que no se estanque el crecimiento económico de la ciudad. En este caso, favorecerá el uso de permisos transables.
- La efectividad deseada de las políticas, es decir, si se busca cumplir con los objetivos de calidad ambiental de manera rápida y segura o si se va a permitir algún grado de incertidumbre en su cumplimiento. Si lograr los objetivos de calidad ambiental es lo prioritario, se utilizarán preferentemente instrumentos de regulación directa.
- La compatibilidad de las políticas propuestas con la estructura administrativa y judicial, condiciones económicas y estructura general de impuestos.
- La disponibilidad de recursos. Si el ente regulador no cuenta con el personal calificado y los recursos, no podrá aplicar una política de diseño o fiscalización compleja, como el uso de permisos espacialmente diferenciados. Una alternativa, en este caso, es utilizar impuestos con el objetivo de recaudar fondos que permitan luego mejorar el diseño y aplicación de las políticas.



- La aceptabilidad política y las presiones de grupos de interés. El ente regulador recibirá presiones desde diversos flancos. Los economistas, presionarán para que las políticas sean eficientes, y por tal motivo favorecerán las de incentivo económico. La regulación directa, entrega una señal más inequívoca de las intenciones de mejorar el ambiente, por lo que tienden a ser preferidas por los políticos y grupos ambientalistas. La industria, prefiere verse sometida a las menores restricciones posibles. Presionará, por ello, para que los estándares de calidad buscados no sean estrictos. Además rechazará la aplicación de impuestos significativos debido al fuerte impacto en sus costos, y probablemente apoyará el uso de sistemas de permisos por sobre el uso de estándares. De la misma manera, aceptará el uso de impuestos reducidos para luego aplicar los fondos recaudados a mejoras ambientales.
- Su concordancia con las políticas ambientales generales aplicadas en el país. Los enfoques varían de un país a otro. Algunos establecen estándares de calidad ambiental, es decir se orientan hacia los efectos de la contaminación. Otros tienen un enfoque orientado hacia las fuentes emisoras. Por ejemplo, para mejorar la calidad de las aguas, es posible utilizar plantas de tratamiento (enfoque orientado a los efectos) o imponer reducciones a las fuentes (enfoque orientado a las fuentes). También se pueden combinar ambas alternativas. Un segundo tema, más directamente relacionado con la contaminación atmosférica, es la aplicación del principio de que "el que contamina paga". Este principio se puede interpretar como que no se utilizarán subsidios. Sin embargo una interpretación más amplia (y más utilizada en la práctica), permite utilizarlos, siempre que los fondos provengan de, por ejemplo, impuestos aplicados a otras fuentes contaminantes.
- El cumplimiento de acuerdos y principios aceptados internacionalmente.

El éxito o fracaso de la política a aplicar, depende crucialmente de estos elementos del contexto. Por ello, el ente regulador, deberá pesar cuidadosamente cada uno de estos aspectos antes de tomar una decisión.

Por cierto, la definición de políticas apropiadas no es más que una parte de la tarea que le corresponde al ente regulador. En un marco más amplio cabe al Estado: (i) generar los antecedentes respecto de los niveles de contaminación atmosférica actuales, y establecer cuáles están excedidos; (ii) identificar las fuentes responsables de la misma; (iii) establecer los impactos de la contaminación sobre la salud y otros aspectos de interés para la ciudad, como la visibilidad o impactos sobre materiales; (iv) promover mecanismos participativos para definir una meta de contaminación aceptable, y priorizar acciones de reducción, pesando los factores anteriores y los impactos económicos de la meta; (v) identificar políticas factibles de aplicar que permitan lograr las metas establecidas al menor costo posible, distinguiendo claramente, entre un plan de reducciones permanentes y planes de emergencia; (vi) generar los mecanismos institucionales capaces de aplicar y luego fiscalizar el cumplimiento de las políticas propuestas, esta tarea es crucial para el éxito de

cualquier política; (vii) promover la participación ciudadana en la fiscalización; (viii) generar mecanismos efectivos de sanción en caso de incumplimiento de la normativa vigente; (ix) educar a los ciudadanos acerca de sus derechos y deberes en relación al medio ambiente.

Para ello, el Estado debe estar dotado de los recursos, capacidad técnica, institucional, y respaldo legal necesarios. En particular, se requieren mecanismos de fiscalización y sanción adecuados. Lamentablemente, una de las falencias principales que se observa en Chile y en países en desarrollo en general, es precisamente la precariedad de recursos materiales y técnicos para desarrollar estas tareas de manera continuada. Esto, en conjunto con problemas de carácter institucional, tales como los enfoques sectoriales predominantes en cada Ministerio y la falta de coordinación entre Ministerios, debilita la labor del ente regulador. En general no es posible hablar de "él" ente regulador ya que la selección de políticas, la tarea de aplicarlas, su fiscalización, las realizan entidades autónomas y con escasa capacidad de coordinación. Como resultado, "las posibilidades para políticas ineficaces, ineficacia injustas son prácticamente ilimitadas" (Morton, 1992, p.23).

Se puede concluir, en segundo término, que la eficacia de una política depende crucialmente del marco institucional en que se aplica. Una política puede ser eficaz en un contexto específico, pero completamente ineficaz en otro, dadas las insuficiencias institucionales presentes. Es necesario examinar cuidadosamente las capacidades institucionales y establecer si se dan las condiciones requeridas para sacar el máximo provecho a las políticas propuestas. De no contarse con estas capacidades, será necesario desarrollarlas oportunamente para que las metas y políticas establecidas no pierden eficacia y credibilidad.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Baumol, W. and Oates, W. [1988], *The Theory of Environmental Policy*, 2.ª Ed., Cambridge University Press, 299 p.
- Bernstein, J. [1991], "Alternative Approaches to Pollution Control and Waste Management: Regulatory and Economic Instruments", Abril, UNDP, 68 p.
- Eskeland, G. y Jiménez E. [1992], "Policy Instruments for Pollution Control in Developing Countries" en *The World Bank Research Observer*, Vol. 7, N° 2, Julio, pp. 145-169.
- Freeman, M. [1981] "The Benefits of Environmental Improvement : Theory and Practice": *Resources for the Future*, The John Hopkins University Press, Baltimore, Ma. 272 p.
- Hahn, R. [1989] "Primer Environmental Policy Design", *Fundamental of Pure and Applied Economics*, 34, Lesourne and Somenschein (Eds) Harvard Academy Publisher, 1356.
- Hahn, R. y Hester G. [1989], "Where the all the markets go? An analysis of EPA's emission trading program" *Journal and Irregulation* volumen 6, N° 1 Winter, pp. 109-153.
- Krupnick, A. [1991], "Urban Air Pollution in Developing Countries: Problem and Policies", *Resources for the Future*, Washington D.C. 62 p., Draft.
- Krupnick, A. Sebastian, I. [1990], "Issues in Urban Air Pollution: Review of the Beijing Case", *Environmental Working Paper N° 31*, Washington D.C. : The World Bank.
- Mendelsohn, R. and Markstrom, D. [1988] "The Use of Travel Cost and Hedonic Methods in Assessing Environmental Benefits", en Peterson G., Driver, B. y Gregory, R., *Amenity Resource Valuation*, pp. 159-166, State College, PA. : Venture Pub.
- Mitchel, R., and Carson, R. [1988], "Evaluating the Validity of Contingent Valuation Studies", en Peterson G., Driver, B. y Gregory, R., *Amenity Resource Valuation*, pp. 187-200, State College, PA. : Venture Pub.
- Morton, B. [1992], "Institutional Arrangements to Facilitate the Design and Implementation of Economic Incentives to Improve Air Quality in Santiago", presentado al Taller Internacional Soluciones para el Problema de la Contaminación Atmosférica en Santiago, Chile, Diciembre 2-5, 1992, 27 p.
- Nyquist, C. [1992], "Economic Instruments in Swedish Environmental Policy", presentado al Taller Internacional Soluciones para el Problema de la Contaminación Atmosférica en Santiago, Chile, Diciembre 2-5, 1992, 7 p.
- OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico), [1989], "The Application of Economic Instruments for Environmental Protection", Paris, 199 p.
- Portney, P. [1990], "Public Policies for Environmental Protection", *Resources for the Future*, Washington D.C., 308 p.
- Schneider, K. [1991], "Using Taxes to Discourage Pollution", *New York Times*, Febrero 27, 1991.
- Tietenberg, T. [1990], "Economic Instruments for Environmental Regulation", en *Oxford Review of Economic Policy*, Vol. 6, N° 1, pp. 17-32.
- Tietenberg, T. [1992], "Market-Based Pollution Control : What Have We Learned?", presentado al Taller Internacional Soluciones para el Problema de la Contaminación Atmosférica en Santiago, Chile, Diciembre 2-5, 1992, 29 p.



CONTAMINACIÓN ATMOSFERICA DE SANTIAGO  
ESTADO ACTUAL Y SOLUCIONES



*PARTE III*

**DISCUSSION GENERAL**

*CAPITULO 13*

*CAPÍTULO 13*  
**DISCUSION GENERAL, CONCLUSIONES  
Y RECOMENDACIONES**

*Hugo Sandoval L.*  
*Margarita Préndez B.*  
*Pablo Ulriksen U.*

*Discusión general 413*  
*Conclusiones 423*  
*Recomendaciones 426*





## DISCUSION GENERAL

La ventilación natural de la cuenca de Santiago está condicionada por los cerros que la rodean y, en épocas de otoño e invierno, cuando hay menor insolación las condiciones de ventilación se deterioran notablemente.

Las características meteorológicas de la ciudad, que son propias de la región central de Chile, están determinadas por la influencia del anticiclón del Pacífico, con flujos atmosféricos débiles y ocurrencia frecuente de una capa de inversión térmica en altura, que limita la extensión vertical de la mezcla superficial. En invierno, la altura de la capa de mezcla es reducida, lo que impide la dispersión vertical de los contaminantes emitidos desde la ciudad.

Los flujos de aire presentan direcciones opuestas entre el día y la noche, dando origen a la recirculación de aire contaminado en la cuenca.

Durante algunos días de los períodos de otoño e invierno, principalmente en las condiciones meteorológicas son muy adversas, lo que conduce a episodios de contaminación atmosférica.

La información meteorológica de la cuenca es reducida. No existen mediciones de perfiles verticales de viento y temperatura y no hay una red meteorológica en la superficie adecuada para la identificación y cuantificación de los problemas de contaminación atmosférica.

Además de las condiciones mencionadas, la ciudad ha experimentado una expansión acelerada hacia la periferia, originando el incremento de costos de la infraestructura urbana de servicios, en las distancias a recorrer, aumento de los tiempos de viaje y mayor congestión vehicular en las vías principales de circulación.

El crecimiento económico futuro, junto al aumento de la población, llevará a una mayor seguridad al agravamiento de algunos de estos problemas. Se puede esperar la expansión del área urbana, el crecimiento en los consumos de energía per cápita.

aumento de la tasa de motorización, por lo tanto, un aumento de las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

Las emisiones vehiculares gravitan fuertemente sobre la contaminación atmosférica de Santiago, por razones intrínsecas a las fuentes, al estado de las vías y a las características generales del sistema de transporte vehicular existente en la ciudad.

Entre estas razones, se pueden citar algunas situaciones específicas:

- El mal estado de conservación de las calles.
- Los problemas de congestión de tránsito, incrementado en algunas arterias por la mala sincronización de semáforos y por los estacionamientos en pistas laterales.
- Las altas emisiones unitarias, especialmente de vehículos en mal estado de mantención.
- La falta de normativas más exigentes para definir la calidad de los combustibles utilizados por los vehículos.
- La falta de incentivos a la población para usar los sistemas de locomoción colectiva urbana.
- La ausencia de incentivos para cambiar hacia vehículos con menores tasas de emisión.

La participación de las emisiones de las fuentes fijas en la contaminación atmosférica de Santiago es relevante, con un 90% en el caso de los óxidos de azufre y en partículas con el 24%. Estas cifras corresponden a estimaciones basadas en emisiones típicas de diferentes procesos y deberán ser verificadas cuando se disponga de mediciones para cada una de las fuentes emisoras.

Dentro de las limitaciones que presenta el sistema vigente para medir o estimar emisiones de los diferentes tipos de fuentes destacan, la falta de regulación sobre los agentes autorizados para realizar mediciones en ductos y chimeneas, lo que imposibilita la comparación de los resultados entre las mediciones realizadas por diferentes empresas autorizadas. Adicionalmente, el Estado carece de capacidad técnica para verificar o certificar por sí mismo tales tipos de mediciones.

Referente a las regulaciones y exigencias de plazos para cumplir con las imposiciones, el país no dispone, en la actualidad, de capacidad técnica a nivel de mercado para efectuar mediciones homologables ni de un nivel de asesoría adecuado a las exigencias que las regulaciones implican. Esto lleva a que el agente emisor, en muchas ocasiones, esté imposibilitado de cumplir con los plazos y metas que el Estado ha impuesto en su calidad de ente regulador, debiendo someterse a multas u otro tipo de infracciones cuya justificación técnica no siempre es clara.

A pesar de que no hay información referente a los impactos de grandes fuentes emisoras sobre la población, es necesario destacar que algunas fuentes de gran poder emisor tienen impacto local y que se requiere tomar prontamente las medidas paliativas correspondientes. Esto es especialmente válido cuando la fuente emite sustancias de reconocida peligrosidad para la salud de la población.

La contaminación atmosférica de Santiago proviene de dos tipos de contaminantes cuyo grado de importancia dice relación con la extensión geográfica que ellos alcanzan. Por una parte, está el material particulado que supera frecuentemente la norma oficial en Chile, en toda la ciudad, durante la mayor parte del año y desde hace años. Por otra parte, están algunos gases, principalmente monóxido de carbono, ozono y óxidos de nitrógeno, cuyas concentraciones son muy altas en ciertas áreas de la ciudad. En los meses de invierno las concentraciones de monóxido de carbono superan frecuentemente la norma, en el área céntrica de la ciudad. El ozono suele exceder su norma particularmente en el sector nororiente de la ciudad, durante el período de primavera y verano. El dióxido de nitrógeno supera la norma en invierno en áreas especiales de la ciudad, vinculadas a un mayor tránsito vehicular. A todo ello se suma que los hidrocarburos gaseosos también presentan altas concentraciones en estas últimas áreas.

En algunos de los contaminantes como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el material particulado, se aprecia una clara variación estacional que muestra sus mayores concentraciones en la época de invierno, coincidente con el período de menor ventilación de la cuenca.

Los valores promedio de contaminantes tales como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y el material particulado total no han aumentado a lo largo de los años, pese al crecimiento de la población y del número de vehículos. La información existente para las partículas respirables, tiene datos confiables sólo sobre el período aproximado de dos años, lo que no es suficiente para establecer tendencias de largo plazo.

Otra característica de los contaminantes es que sus concentraciones muestran cambios a lo largo del día, lo que implica un distinto grado de exposición de las personas. Esto ocurre con las partículas y algunos elementos traza y sustancias presentes en ellas (plomo, cobre, carbono, azufre e hidrocarburos aromáticos policíclicos, entre otros), así como también con algunos gases, como el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, que muestran un máximo en la mañana y otro en la tarde. En cambio, el ozono presenta su máximo alrededor del mediodía. En este sentido, el comportamiento de los contaminantes en Santiago corresponde al observado en otras ciudades contaminadas de la tierra.

Se observa poca mezcla en el material particulado que se encuentra sobre y bajo la capa límite atmosférica, atribuible a la difícil dispersión de los contaminantes en el sentido vertical, debida básicamente a la existencia de la capa de inversión térmica.

El aire de Santiago presenta una concentración de partículas respirables que supera la norma vigente en distintos lugares y períodos del año, no siendo toda la contaminación de origen antrópico. La concentración basal o de referencia de partículas es del orden de 55 y 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de partículas respirables y totales en suspensión, respectivamente. Cualquier medida que se implemente en cuanto a las actividades sobre las diferentes actividades desarrolladas en la ciudad, tiene un impacto



débil, puesto que no se conoce la concentración real de partículas que entran con el aire de renovación del valle.

En cuanto a los gases con norma de calidad de aire, la situación es desconocida debido a que no hay mediciones que indiquen los niveles de concentración de sustancias gaseosas que entran con el aire de renovación.

Respecto a la presencia de sustancias en las partículas para las que no hay norma en Chile, es preciso plantear algunas consideraciones que exigen mayor atención de parte de las autoridades en cuanto al conocimiento e imposición de normativas y de control de emisiones. Por ejemplo, el contenido de plomo en las partículas respirables alcanza niveles que en ocasiones superan la norma, vigente en los Estados Unidos, de  $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , especialmente en el área céntrica de Santiago; el plomo es emitido categóricamente por vehículos gasolineros. Los sulfatos, tanto en polvo total como en el respirable, superan ocasionalmente en otoño e invierno la norma del Estado de California de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y, con frecuencia el criterio de calidad sugerido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Un porcentaje superior al 85% de estas sustancias se encuentra en las partículas de alta respirabilidad. Situación similar ocurre con nitratos, amonio y halogenuros. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos presentan concentraciones muy altas, entre las mayores del planeta, especialmente en el área céntrica, durante los meses de invierno, con el agravante de que entre ellos se han determinado algunos de probada acción mutagénica. Desafortunadamente, el país no dispone de antecedentes sobre las concentraciones de los productos derivados de las transformaciones que estos hidrocarburos experimentan en el aire dentro de los que destacan nitroderivados y compuestos oxigenados del tipo aldehídos y cetonas.

Las concentraciones de los gases en Santiago, exceptuando el ozono que es monitoreado en una estación móvil, presentan algunas limitaciones, dentro de las cuales destacan la poca confiabilidad de sus valores a causa de la obsolescencia de algunos equipos monitores y la falta de verificación de las calibraciones. Además, la representatividad del área monitoreada de la ciudad, está limitada por el reducido número de estaciones instaladas en ella.

La distribución espacial de los niveles de contaminación en la ciudad y sus variaciones en el tiempo, hacen presumir que se producirán diferentes tipos de efectos sobre la salud de las personas. No obstante, los estudios epidemiológicos realizados a la fecha, no entregan resultados concluyentes al respecto.

Sin embargo, se observan efectos "difusos", tales como dolores de cabeza, irritación ocular y otros, entre las personas que concurren al centro y al sector comercial de Providencia.

En todo caso, los antecedentes internacionales son claros en señalar que, con los niveles de contaminación que se observan en Santiago, existen riesgos elevados de efectos sobre las personas. Esta conclusión es especialmente importante para aquellas especies contaminantes que muestran niveles elevados a través de toda el área urbana o de gran parte de ella, como las partículas, el monóxido de carbono y el ozono.

Existen también riesgos a la salud de las personas por concentraciones elevadas de sustancias tóxicas o peligrosas, que no han sido evaluadas en forma sistemática entre ellas, el plomo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos y los sulfatos.

Tampoco existen resultados experimentales sistemáticos de los niveles de exposición de personas que trabajan o permanecen en calles congestionadas, emisiones vehiculares importantes. Algunos resultados indican que los niveles de monóxido de carbono se exceden en forma significativa, lo cual hace presumir que podrían existir problemas asociados a otros contaminantes.

La suciedad causada por la contaminación atmosférica se manifiesta en forma muy notoria, en fachadas de edificios que requieren limpieza frecuente, en la ropa de las personas y en el depósito de polvo, incluso en ambientes cerrados (muebles, cortinas y muros).

La reducción de la visibilidad en Santiago es muy notoria y no existen antecedentes de sus cambios históricos ni de sus tendencias. Tampoco se ha evaluado el valor que las personas asignan a la pérdida de belleza escénica en Santiago.

Adicionalmente, cabe destacar el desconocimiento sobre la contaminación interior de las viviendas, producto de las actividades desarrolladas, del medio calefacción usado y del combustible empleado, así como del estado de operación que se encuentran los artefactos en uso.

Este es un tema de gran vigencia en la actualidad y debe ser estudiado por las autoridades, por las consecuencias que trae, a causa del prolongado tiempo que permanecen en los hogares, tanto en niños como en ancianos.

La literatura especializada internacional indica que la contaminación atmosférica tiene efectos significativos sobre seres vivos (animales y vegetales) y materiales. En Santiago, no existen antecedentes cuantitativos al respecto.

Los efectos de la contaminación atmosférica sobre la producción agrícola son poco conocidos internacionalmente. No hay antecedentes de este tipo en la cuenca de Santiago.

Para el proceso de control de la contaminación atmosférica de la Región Metropolitana, existe un plan maestro de descontaminación, complementado con planes específicos para diferentes aspectos. Este distingue entre las políticas de descontaminación aplicadas a mediano y largo plazo y el plan de emergencia.

El plan de emergencia es un paliativo para situaciones coyunturales. En este sentido, algunas medidas aplicadas en forma continua durante meses, pierden carácter de ocasional y pasan a influir las decisiones de largo plazo de los afectados. Entre estas últimas, la restricción vehicular es la medida más discutible. Sobre las medidas se observan los siguientes comentarios:

- Su aplicación en forma continua desde abril a diciembre, durante los últimos años, induce a las personas a buscar alternativas permanentes.
- No se justifica imponer restricciones de emergencia durante los meses en que la contaminación atmosférica no alcanza niveles de riesgo. A partir de septiembre no se observan episodios significativos.



- Los sectores de mayor ingreso optan por adquirir más vehículos, no por mejores, con lo cual no se consigue realmente el efecto deseado. Por el contrario, al contar con otro vehículo, éste es utilizado por otros miembros del grupo familiar. El efecto neto es un aumento del flujo vehicular.
- Faltan absolutamente los incentivos que promuevan la renovación del parque vehicular con vehículos de menores tasas de emisión. Al contrario, las disposiciones actuales ponen trabas al proceso, aumentando los precios y exigiendo revisiones adicionales para los vehículos nuevos.
- Los sectores de ingreso medio tratan de optar también por un segundo automóvil. Esto tiende a dificultar la renovación del parque vehicular, manteniendo en uso vehículos que, de otra forma, habrían salido de circulación. La restricción, por lo tanto, afecta en mayor grado a sectores de menor ingreso y tiene un carácter socialmente discriminatorio.

La restricción favorece directamente a los proveedores de servicios de transporte público (buses y taxis), puesto que reduce la oferta y aumenta la demanda. Esta reducción forzada de la oferta puede inducir al aumento del parque de buses y taxis.

De acuerdo con antecedentes preliminares, la disminución en los flujos vehiculares es bastante menor al 20% correspondiente a la restricción.

Respecto a las medidas de largo plazo aplicadas en Santiago a los vehículos, cabe comentar los siguientes aspectos:

- Las exigencias establecidas para emisiones de vehículos nuevos a gasolina son adecuadas, ya que se logra una reducción de emisiones para varios contaminantes.
- No hay información disponible sobre la duración de los convertidores catalíticos en uso en el país, por lo que es incierta la vida útil de estos dispositivos. El usuario no tiene información para poder optar por diferentes equipos.
- El Estado debe velar por la transparencia de este mercado, exigiendo que los proveedores de vehículos definan los períodos de garantía de funcionamiento y las limitaciones por las cuales el equipo disminuye su eficiencia.
- Las experiencias de introducción del convertidor catalítico en otros países demuestran que toma largo tiempo el reemplazo total de vehículos antiguos. Por ejemplo, en Suecia, al cabo de 6 años de introducida la exigencia del catalizador en vehículos nuevos, el reemplazo sólo alcanza al 30% del total del parque vehicular.
- La situación de Santiago merece la identificación y aplicación de medidas originales, inteligentes e imaginativas que aceleren la incorporación de vehículos con convertidor catalítico.
- Actualmente, las autoridades están realizando controles de emisión de gases en la vía pública, aplicando sanciones a los conductores cuyos vehículos están sobre las normas de emisión definidas. En este caso, no está clara la responsabilidad, pues normalmente los vehículos son mantenidos en talleres y controlados en servicios

de revisiones técnicas autorizados por la autoridad encargada de este control.

- La evidencia empírica nacional muestra que las emisiones de los vehículos gasosos cambian en forma aleatoria y no es posible mantenerlas en un rango predecible. Para corregir este problema, es necesario utilizar convertidor catalítico, aunque no es posible implementar en los vehículos usados, por razones técnicas y económicas.

Entre los planes de descontaminación, se incluye la creación de áreas verdes, la reforestación de cerros y otros suelos del entorno de Santiago. Sin embargo, la creación de áreas verdes no resuelve en forma directa los problemas de contaminación. Las plantas se verán afectadas por algunos contaminantes, pero no ayudan a reducir las emisiones desde las fuentes responsables. Por lo tanto, la creación de áreas verdes es deseable sólo como parte del mejoramiento del paisaje urbano y por las oportunidades de esparcimiento y recreación que generan.

No obstante, las áreas verdes pueden ayudar a evitar problemas de erosión y, por lo tanto, reducir en forma indirecta las emisiones de polvo a la atmósfera. Por otra parte, estas áreas y los jardines adyacentes a las vías de circulación, generalmente constituyen fuentes de polvo que es arrastrado hacia las vías y causan emisiones a la atmósfera. El diseño y mantención de ellos debe cuidar este aspecto.

La reforestación debe considerar, por otra parte, que las plantas emiten compuestos orgánicos gaseosos y algunas pueden dar origen a problemas causados por su participación en reacciones que producen transformaciones de contaminantes en la atmósfera.

Las expectativas de solución del problema por parte de diferentes sectores de la sociedad, superan la velocidad con que el Estado aplica las medidas. Este balance entre expectativas y logros ha generado una serie de críticas al quehacer de los organismos encargados de su solución.

Las realidades económicas y sociales de los países en vías de desarrollo son similares en muchos aspectos. Esto cobra importancia cuando se trata de aplicar experiencias nuevas en ámbitos diferentes. Por el contrario, se presentan muchas dificultades al adoptar como modelo a las políticas implementadas en los países industrializados, cuyos escenarios son enteramente diferentes. No obstante, ejemplos también deben ser considerados, pues constituyen, en muchos casos, modelos a los cuales tender. Así entonces, los problemas de contaminación atmosférica que se presentan en Santiago de Chile pueden ser comparados con los observados en ciudades como Sao Paulo, Ciudad de México, la zona Ruhr o Estocolmo.

La ciudad de Sao Paulo, por ejemplo, supera largamente en extensión a Santiago, con una población tres veces mayor, con condiciones naturales diferentes, con un número de industrias que supera a las de Santiago en casi diez veces y con un parque vehicular aproximadamente ocho veces mayor, incluyendo 11.000 buses y 35.000 taxis.



La contaminación en esta ciudad es provocada fundamentalmente por las concentraciones de gases provenientes de los vehículos motorizados. También hay problemas locales generados por partículas (de fuentes industriales, vehiculares y otras, como obras civiles, calles no pavimentadas, sitios eriazos).

El monitoreo de contaminantes se lleva a cabo mediante 25 estaciones automáticas y 2 móviles.

La política implementada ha conducido a reducciones importantes de dióxido de azufre y partículas. Algunas de las medidas utilizadas consideran:

- Exigencia de petróleo con contenido de azufre inferior al 1%, en los diferentes procesos de combustión externa.
- Aplicación de tecnologías limpias en procesos industriales para la limitación de emisiones desde fuentes fijas.
- Aplicación de multas diarias para los reincidentes que no cumplen con la normativa vigente.

Si bien la contaminación de la ciudad de Sao Paulo se encuentra bastante controlada, aún son preocupantes las concentraciones de monóxido de carbono, de óxidos de nitrógeno y de compuestos orgánicos volátiles, para lo cual se ha establecido un programa de reducciones futuras a operar entre 1989 y 1997. Este implanta reducciones del orden de un factor 10 para las emisiones de monóxido de carbono, 7 para compuestos orgánicos volátiles y 3,5 para los óxidos de nitrógeno.

La Ciudad de México, también supera largamente en extensión a Santiago, con una población tres veces mayor, con algunas condiciones naturales similares, tales como la forma de la cuenca, vientos y el fenómeno de inversión térmica frecuente. Sin embargo, otras son claramente diferentes: la cantidad de industrias supera a las de Santiago en diez veces y su parque vehicular es cinco veces mayor, incluyendo 56.500 taxis y 7.500 buses.

En la actualidad, la contaminación atmosférica de la ciudad se asocia fundamentalmente a los altos niveles de partículas, con un importante aporte natural, y de ozono, derivado principalmente de la presencia de altas concentraciones de compuestos orgánicos. Otro problema lo constituyen las altas concentraciones de plomo observadas.

Las emisiones totales de monóxido de carbono, que superan casi en diez veces las de Santiago, se habían logrado controlar hace algunos años. A partir de 1990, han empezado a aumentar nuevamente.

La política que se ha implementado incluye diversos aspectos. Entre ellos destacan:

- El mejoramiento de los combustibles, que incluye:  
Gasolina: agregando compuestos oxigenados y reduciendo el contenido de plomo en factores de 6 a 7, en los últimos 12 años. Además, introduciendo la gasolina sin plomo. En 1992, el abastecimiento alcanzaba al 26% del total.  
Petróleo diesel: control del porcentaje de azufre a un valor algo mayor que el 0,5%

- y sustitución de petróleo por gas natural en centrales eléctricas e industrias.
- Modernización y racionalización del transporte colectivo, incentivo al transporte público, con la ampliación del metro y la renovación del parque vehicular público a la vez que desincentiva el transporte particular al cual, entre otras cosas, exige la introducción de convertidores catalíticos.
- En el área industrial se promueve el mejoramiento de los procesos mediante incorporación de tecnologías limpias, equipos de abatimiento de emisiones y motores eficientes.
- En otros aspectos, el plan incluye la reforestación y recuperación de degradadas mediante pavimentación de calles y caminos y mejor drenaje.
- El programa completo considera un plan permanente y planes de emergencia operan en el período invernal y en ocasiones de contingencias ambientales.

Los resultados muestran reducciones del 10% de las emisiones en cuatro con un costo aproximado de 2,5 a 3 mil millones de dólares.

Miradas globalmente, las políticas aplicadas en Sao Paulo y en Ciudad de México, muestran varias similitudes con las correspondientes al Plan Maestro aplicado en Santiago, aún cuando aquellas se ven claramente más exigentes.

El caso de la zona del Ruhr de Alemania, región eminentemente industrial, muestra una fuerte reducción de las emisiones, entre un 20 y un 80%. El mayor está dado por la reducción de las emisiones industriales (industria química, del hierro y el acero y plantas de generación de energía).

A comienzos de 1980, se había avanzado en el control de la contaminación atmosférica generada por las industrias, pero no así con la producida por los vehículos móviles. Se impulsaron entonces políticas de control que dieron origen a unos planes más enérgicos del mundo, particularmente debido a la estrictez de los estándares exigidos, pero aplicando a la vez normas de calidad ambiental más estrictas que las de otros países.

La normativa considera emisiones máximas por semana y no por día u hora como es lo más generalizado.

El plan incluyó el uso de sistemas inteligentes para disminuir el volumen de emisiones, mejoras en la calidad de los combustibles, desarrollo de combustibles alternativos y tecnologías más eficientes para su uso.

Las mejoras en el combustible consideran reducción del contenido de azufre 0,3 al 0,15%. Se ha establecido, además, la reducción del contenido de benceno 2,5 a menos del 1%, lo que ha implicado una disminución de las emisiones en un 20%.

Para reducir el flujo vehicular, cuyo parque es de 2,4 millones, se desincentiva el uso de los vehículos particulares mediante la aplicación de impuestos al consumo de combustibles, restricción de circulación para vehículos sin catalizador o filtros en ciertas vías o cierre de algunas de ellas.

El costo estimado del programa asciende a unos 14.000 millones de dólares.

El caso de la ciudad de Estocolmo tiene algunos elementos nuevos e inter-



tes de considerár. Se trata de una ciudad más bien pequeña, donde la población del área completa alcanza a 1,5 millones de habitantes (aproximadamente un tercio de la población de Santiago). Por ella se desplazan 700 mil vehículos. La ciudad no tiene problemas de contaminación atmosférica generada por su propia vida. Sin embargo, hoy en día, el dióxido de azufre constituye un problema secundario derivado del aporte recibido desde otros puntos de Europa. En 1970, Suecia recibía 480 mil ton/año de azufre, de las cuales 380 mil eran importadas.

Esta peculiar situación obligó a establecer una ley de protección del medio ambiente hacia 1969. Desde entonces las políticas implementadas han definido límites de emisión a las plantas de energía y han aplicado impuestos especiales para desincentivar el uso de ciertos combustibles, como el impuesto al contenido de azufre en el carbón y petróleo. Contra las emisiones vehiculares, han incentivado el uso del transporte público. Las políticas aplicadas han hecho que el dióxido de azufre de origen propio se reduzca en un 67%, aproximadamente.

A partir de 1989, disponen de gasolina sin plomo para vehículos con y sin convertidor. Actualmente un tercio del parque vehicular tiene convertidor catalítico.

A partir de enero de 1992, está vigente un impuesto a las emisiones de dióxido de nitrógeno.

Las experiencias de las ciudades anteriormente citadas pueden servir de orientación para el diseño de políticas y programas a desarrollar en el caso de Santiago.

No cabe duda que para el Área Metropolitana de Santiago, el control de la contaminación pasa por la elaboración de una normativa adecuada.

En la generación de normas se deben optimizar los mecanismos que permitan la participación de los agentes involucrados en el problema, con el fin de que todos los sectores puedan plantear sus opiniones y se logre una aceptación generalizada de las regulaciones. Las decisiones finales deben ser tomadas por instancias representativas, cuyas decisiones sean respetadas por los afectados.

La normativa reciente para fuentes fijas ha establecido límites a las emisiones de partículas. No existe aún una normativa referida a los compuestos químicos peligrosos.

Las normas de emisión establecidas recientemente para vehículos nuevos, son más exigentes con los vehículos de uso particular que con los utilizados en la locomoción colectiva, en circunstancias que estos últimos emiten, comparativamente, muchas más sustancias peligrosas.

Para el control de emisiones de grandes fuentes fijas, se ha propuesto un sistema de intercambio de reducciones entre fuentes emisoras (licencias transables). Con respecto a este mecanismo, deben tomarse en cuenta algunos problemas:

- No se pueden aceptar intercambios de emisiones de sustancias diferentes, como por ejemplo, material particulado con sustancias peligrosas por otro contaminante de menor peligrosidad.
- En principio, se podría plantear la posibilidad de ajustar las emisiones a la

capacidad de dilución de la cuenca, en cada instante. Esto llevaría a que emisiones fluctuarán según las condiciones meteorológicas del momento. Un ejemplo más simple es aceptar la variación anual de las emisiones, puesto que en verano existe mayor capacidad de dilución en la cuenca. Para permitir variación de las emisiones en el tiempo, debería existir:

- Información adecuada de la capacidad receptora de la cuenca, en función del tiempo.
- Capacidad de ajustar las emisiones a esas variaciones.
- Capacidad de controlar que las fuentes emisoras están cumpliendo, en cada momento, con las limitaciones determinadas por la capacidad de dilución de la cuenca.

No parece adecuado, en este momento, dejar abierta la posible fluctuación de las emisiones, puesto que no se cuenta con la capacidad real de control en forma permanente, ni siquiera en las condiciones actuales de régimen estacionario.



## CONCLUSIONES

- El aire de Santiago ha alcanzado niveles de saturación en partículas total suspendidas y, en algunos casos, en partículas respirables y monóxido de carbono. La cota de saturación está dada por la norma de calidad del aire, para los contaminantes, como las partículas respirables y el monóxido de carbono.
- Los planes de desarrollo urbano para Santiago deben incorporar la variación de la contaminación atmosférica, especialmente en relación a los desplazamientos de las personas, tratando de reducir los kilómetros recorridos por viaje y, por lo tanto, las emisiones asociadas a ellos.
- La Región Metropolitana de Santiago requiere de una autoridad única, con facultades de resolución para el manejo de la contaminación atmosférica.
- El uso de medidas paliativas de contaminación atmosférica debe hacerse durante los meses en que la concentración de contaminantes es alta y no cuando la atmósfera tiene capacidad de dispersión.
- Es impostergable que la autoridad retire en forma definitiva de la circulación por las vías de Santiago los vehículos que emiten humos visibles por el tubo de escape, sean públicos o privados, gasolineros o petroleros.
- La Región Metropolitana de Santiago debe disponer de combustibles que tengan una baja tasa de emisión.
- El monitoreo de calidad de aire de Santiago es deficitario en términos de representatividad geográfica, por lo tanto, es necesario aumentar su número.
- La red meteorológica de la cuenca de Santiago es deficitaria.



- El manejo adecuado y oportuno de las condiciones de episodios de contaminación requiere de un pronóstico confiable de su ocurrencia. Las deficiencias en la información meteorológica disponible para la cuenca son una gran limitante para el pronóstico. Las consecuencias más notorias son:
  - Se producen desfases entre las condiciones de episodio y las medidas aplicadas para reducir sus efectos,
  - Se genera una falta de credibilidad en el pronóstico y por lo tanto, en la oportunidad de las medidas,
  - Se pueden producir costos adicionales innecesarios, tanto por la no aplicación de medidas de control (costos por efectos no mitigados), como por la aplicación de medidas en momentos que no se requieren (costos por controles no necesarios).
- Urge mejorar el estado de las vías de circulación de la red vial primaria y secundaria, para tener un flujo vehicular ágil, seguro y cómodo.
- No se justifica cursar infracciones por el control de gases en la vía pública a vehículos gasolineros, puesto que sus emisiones cambian en forma aleatoria y no hay respaldo técnico para ello.
- El crecimiento del parque vehicular tenderá a agravar los problemas de congestión actualmente existentes. Las estimaciones indican que para el año 2000, se duplicará el parque, superando el millón de vehículos en la ciudad.
- Las proyecciones de crecimiento del parque vehicular indican que, entre los años 2005 y 2010, las emisiones llegarán a niveles comparables a los actuales, aceptando que todos los vehículos utilicen convertidor catalítico.
- El Estado debe hacer o permitir inversiones en infraestructura vial que mejoren las condiciones del tránsito vehicular urbano.
- Las condiciones naturales de la cuenca son una limitante para el aumento de las emisiones ya que los problemas ambientales se agravarán, debido al desarrollo urbano y al crecimiento económico.
- Las malas condiciones de calidad del aire que actualmente tiene Santiago deben servir como ejemplo, para evitar su repetición en el futuro, en otras ciudades ubicadas en zonas de características geográficas parecidas. Esto es de particular importancia en valles encerrados, como los existentes en la región central y norte del país.
- Es urgente caracterizar el aire de entrada al valle, para definir el nivel de referencia y de esa forma plantear e implementar exigencias a los procesos emisores mediante regulaciones específicas.
- Al hacer la relación número de buses por habitantes, se observa que ésta es cuatro veces superior a la de Sao Paulo y cinco veces mayor a la de Ciudad de México.
- Santiago presenta una subutilización de la locomoción colectiva, observándose con frecuencia que los buses circulan con un reducido número de pasajeros. Esta capacidad ociosa de los buses proviene directamente de una sobre oferta y de la falta de coordinación de las líneas de buses entre sí y con el metro, compitiendo

en recorridos que circulan por las mismas vías. Cabe mencionar que la futura 5 del metro correrá paralela a una de las avenidas de mayor flujo vehicular ciudad. Situación que debe resolver la autoridad correspondiente.

- Se ha sugerido que las transacciones entre fuentes podrían permitirse entre lugares distantes geográficamente, por ejemplo, entre diferentes barrios industriales. Esta modalidad crea problemas para evaluar los efectos de reducción de las emisiones en uno y otro lugar. Si los intercambios se realizan, se sugiere que se hagan en fuentes ubicadas en las mismas zonas (burbujas geográficas).
- El Estado debe asumir el rol de regulador de los problemas de contaminación. Los agentes contaminadores y los afectados son numerosos y no fácilmente identificables en las grandes urbes, por lo que la comunidad espera que el Estado actúe como regulador.
- El Estado debe velar porque los combustibles cumplan con requerimientos ambientales, especialmente aquellos que son quemados en forma abierta al interior de las viviendas, por la incidencia de los productos de la combustión en la calidad del aire de éstas. Además, debe contar con los medios para controlar periódicamente la calidad de todos los combustibles.
- Entre las tareas que le corresponderían al Estado, se incluyen:
  - Generar los antecedentes necesarios relacionados a los niveles de contaminación.
  - Identificar las fuentes responsables de la contaminación.
  - Evaluar los riesgos de la contaminación sobre la salud de las personas y sus efectos.
  - Promover la definición de metas de calidad de aire, mediante mecanismos participativos.
  - Priorizar entre las acciones de reducción de emisiones.
  - Identificar las políticas que permitan lograr las metas establecidas, en plazos definidos.
  - Evaluar los costos asociados al cumplimiento de estas acciones y plantear los mecanismos de financiamiento de ellos.
  - Generar los mecanismos institucionales capaces de aplicar las políticas y fiscalizar su cumplimiento.
  - Crear los mecanismos de sanción en caso de incumplimiento de la normativa.
  - Promover la educación de los ciudadanos referente a sus derechos y deberes relacionados con el medio ambiente.
  - Desarrollar campañas de difusión que permitan una mejor comprensión del problema por la comunidad y logren comprometerla con las soluciones planteadas.



## RECOMENDACIONES

- I. Mejorar las condiciones en que se encuentran las calles de Santiago que, debido al deterioro del pavimento, actúan como retardadoras del tránsito, aumentando las emisiones a causa del cambio en el ciclo de manejo.
- II. Evitar cambios de nivel en las calles producidos por reparaciones defectuosas, resaltos para reducir velocidad en red vial primaria, ruptura de vías y no instalación de plancha metálica o de otro tipo adecuada a las condiciones de operación de ellas.
- III. Disponer de un sistema público de información de arterias que tienen problemas de circulación vehicular por cierre temporal de una o más vías o total, especialmente en la red vial primaria.
- IV. Evitar que en las calles de alto tráfico, en zonas con problemas de contaminación, sea permitido estacionar con parquímetro o resolución especial.
- V. Agilizar el tráfico mediante semáforos bien sincronizados, poniendo énfasis en la mantención y reposición del servicio después de alteraciones en su funcionamiento, causadas por las lluvias o cortes de energía, entre otras.
- VI. Disponer de regulaciones específicas sobre las emisiones en gramos por kilómetro para vehículos nuevos, a gasolina y petróleo, que entren en circulación por la ciudad. Exigir la vigencia de éstas por un número de kilómetros recorridos, definido por el fabricante.
- VII. Garantizar la capacidad técnica de los talleres mecánicos para realizar una mantención eficiente y real de los vehículos.
- VIII. Desincentivar el uso de automóviles particulares a través de la disponibilidad de un transporte público cómodo, seguro, limpio y eficiente.
- IX. Para Santiago, que presenta un problema muy grave de contaminación, se debieran plantear algunas medidas que tiendan a acelerar el proceso de introducción de convertidores. Por ejemplo, incentivos económicos, impuestos especiales a emisiones elevadas.

- X. Teniendo en cuenta el aporte de sustancias peligrosas (como hidrocarburos aromáticos policíclicos) que hacen los vehículos con motor diesel, es necesario establecer normas más exigentes para ellos y llevar a cabo implementación con rapidez, en plazos más cortos que los fijados para otros fuentes.
- XI. El aporte de los buses a las emisiones indica que la autoridad encargada de problemas de transporte urbano de Santiago, debe disponer de medidas logren conducir a una organización más racional del sistema de transporte público.
- XII. Las emisiones de los procesos industriales y de combustión externa: general, en un futuro próximo, deben ser reguladas en sustancias riesgosas para la salud, en gases y en partículas, e imponer distribución de tamaño a éstas últimas. Sobre este punto, hay que recalcar, una vez más, que se carece de capacidad técnica para efectuar las mediciones correspondientes. Por tanto, su implementación requiere previamente contar con la infraestructura necesaria que garantice la posibilidad de realizar las mediciones comentadas.
- XIII. Actualmente, Santiago carece de evaluaciones reales que permitan estimar el aporte de fuentes emisoras del tipo incendio de bosques y pastizales, quema de basuras y desechos en general, emisiones provenientes de actividades agrícolas y de polvos fugitivos. Esto requiere de parte de la autoridad competente implementar estudios de evaluación y empíricos, que permitan disponer del dimensionamiento real de la participación de estas fuentes en la contaminación atmosférica de Santiago.
- XIV. Disponer de combustibles que tengan una baja tasa de emisión de contaminantes, con norma de calidad de aire, y de sustancias riesgosas para la salud.
- XV. Se recomienda desarrollar e implementar normas de calidad de combustibles a usar en la Región Metropolitana, que contengan regulaciones del tipo:
  - Contenido de azufre máximo de 1% para el carbón mineral, petróleo y combustible N° 5 y 6. En el caso del petróleo diesel, gasolina y kerosén reducirlos a los valores permitidos en los Estados Unidos.
  - Fijar el contenido de aromáticos en gasolinas y petróleo diesel.
  - Definir el contenido máximo de olefinas en gasolinas y gas licuado.
  - Precisar los valores que deben tener aquellos factores que influyen en el funcionamiento de los procesos de combustión.



- Definir el contenido de residuos posible de acumular en los cilindros de gas licuado.
  - Fijar como contenido máximo de humedad en leña de combustión un valor menor o igual a 25%.
  - Fijar contenido de cenizas en carbón, petróleo combustible N° 5 y 6.
  - Precisar poder calorífico de los combustibles en uso en la Región Metropolitana: leña, carbón, derivados de petróleo, gas natural y de cañería.
  - Definir composición química de gas licuado, cañería y gas natural.
  - Precisar contenido y características de aditivos agregados a los combustibles usados en procesos de combustión interna y a los aceites lubricantes.
- XVI. Identificar sustancias presentes en el aire de Santiago, incluyendo especies que no están siendo medidas en forma regular.
- XVII. Establecer un programa regular de muestreo de sustancias especiales. En la actualidad no existe un programa de seguimiento de la calidad del aire, para sustancias diferentes a las medidas en forma rutinaria. Por ejemplo, no hay análisis de la composición del material particulado.
- XVIII. Las reducciones globales de emisiones de partículas en la cuenca de Santiago deben ser significativas, debido a la magnitud en que se exceden las normas.
- XIX. El Estado debe desarrollar estudios de evaluación y empíricos, que permitan dimensionar el problema de contaminación del aire al interior de viviendas.
- XX. Disponer de medidas punitivas contra los infractores de algunas de las ideas planteadas anteriormente, sean instituciones públicas, privadas o cualquier persona natural.
- XXI. El Estado debe disponer de la capacidad técnica material y humana, que le permita evaluar las políticas aplicadas, en relación a opciones tecnológicas o medidas paliativas orientadas a disminuir las emisiones en forma permanente o temporal.
- XXII. Puesto que Chile es un país en vías de desarrollo, las exigencias deben ser acordes con la disponibilidad de recursos de las empresas, a las cuales se les ha impuesto reducir drásticamente sus emisiones. Esto es relevante, especialmente, cuando los plazos son breves dentro de la escala de las grandes inversiones o en aquellos casos en que la disponibilidad tecnológica en el país es reducida.

- XXIII. El Estado debe hacer esfuerzos para garantizar a la comunidad que las exigencias o recomendaciones implementadas son representativas de la realidad que amerita su ejecución.
- XXIV. Para reducir el problema de contaminación atmosférica de Santiago requiere que el Estado aumente su capacidad en este tema, tanto en lo que refiere a recursos humanos y tecnológicos, como institucionales, prioridades en sus acciones que incluyan temas, plazos y asignación de recursos.
- XXV. El Estado debe establecer un sistema que permita auditar en forma independiente los resultados de las acciones implementadas y, para ello, debe disponer de recursos.
- XXVI. La Región Metropolitana debe contar con información básica sobre contaminantes, meteorología y emisiones, que permita aplicar las medidas adecuadas y verificar su efectividad. Para ello, se deben desarrollar los sistemas de monitoreo de contaminantes, parámetros meteorológicos y las bases de datos de emisiones.





*Esta publicación fue editada a partir  
de un proyecto conjunto  
de la Universidad de Chile,  
la Comisión Especial de Descontaminación  
de la Región Metropolitana  
y el Banco Santander.*

*El diseño de este libro fue realizado  
por Ximena Ulibarri L. y Paulina Lagos I.*

*Los textos en computación gráfica,  
por Rosa María Espinoza O.  
y Guillermo Salgado D.*

*Impreso en Editora e Impresora  
Cabo de Hornos S.A.,*

*en el mes de agosto de 1993.*

*Esta primera edición  
consta de 3.000 ejemplares.*

*El texto está compuesto en Times Roman  
y en Helvética.*

*Para las páginas interiores se utilizó  
papel reciclado nacional de 80 grs. ecograf,  
y para la portada papel couché de 270 grs.*

*Ha sido encuadernado con costura al hilo y la cubierta,  
en sistema hot melt.*

*© Inscripción: 87.270*

*I.S.B.N.: 956-19-0185-4*